



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA CHEMICKÁ

FACULTY OF CHEMISTRY

ÚSTAV CHEMIE MATERIÁLŮ

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE

**VÝMĚNA HMOTY KAPALINA-PÁRA V PROCESECH
STRIPOVÁNÍ**

LIQUID-VAPOR MASS EXCHANGE IN STRIPPING PROCESSES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Liman

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Tomáš Svěrák, CSc.

BRNO 2021

Zadání diplomové práce

Číslo práce: FCH-DIP1594/2020 Akademický rok: 2020/21
Ústav: Ústav chemie materiálů
Student: **Bc. Martin Liman**
Studijní program: Chemie, technologie a vlastnosti materiálů
Studijní obor: Chemie, technologie a vlastnosti materiálů
Vedoucí práce: **prof. Ing. Tomáš Svěrák, CSc.**

Název diplomové práce:

Výměna hmoty kapalina–pára v procesech stripování

Zadání diplomové práce:

- literární rešerše procesů desorpce
- spolupráce při návrhu a realizaci stripovacího experimentálního zařízení
- spolupráce při formulaci a využití analytické metody stanovení NH₃ ve fugátu v laboratorních podmínkách ÚCHM
- experimenty v oblasti separace amoniaku z fugátu bioplynových stanic
- vyhodnocení experimentů

Termín odevzdání diplomové práce: 28.5.2021:

Diplomová práce se odevzdává v děkanem stanoveném počtu exemplářů na sekretariát ústavu. Toto zadání je součástí diplomové práce.

Bc. Martin Liman
student(ka)

prof. Ing. Tomáš Svěrák, CSc.
vedoucí práce

doc. Ing. František Šoukal, Ph.D.
vedoucí ústavu

V Brně dne 1.2.2021

prof. Ing. Martin Weiter, Ph.D.
děkan

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá řešením separace amoniaku z odpadních surovin zemědělské výroby. Zaměřuje se na stanovení účinnosti desorpce z experimentálního stripovacího zařízení v závislosti na teplotě měření. Pro ověření funkčnosti zařízení byly využity roztoky čpavkové vody a vzorky fugátu z technické praxe. Byla prokázána zvyšující se účinnost separace s rostoucí teplotou. Zařízení bylo během měření postupně zdokonalováno pro lepší výnosnost separačního děje. Výsledky pokusů jsou diskutovány v návaznosti na teoretické předpoklady a srovnány s jinými způsoby separace amoniaku.

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the solution of ammonia separation from waste raw materials of agricultural production. It focuses on determining the efficiency of desorption from an experimental stripping device depending on the measurement temperature. Ammonia water solutions and liquid digestate samples from technical practice were used to verify the functionality of the equipment. Increasing separation efficiency with increasing temperature has been demonstrated. The device was gradually improved during the measurement for a better profitability of the separation process. The results of the experiments are discussed concerning the theoretical assumptions and compared with other methods of ammonia separation.

KLÍČOVÁ SLOVA

Desorpce, stripování, separace amoniaku, kejda, fugát

KEYWORDS

Desorption, stripping, ammonia separation, slurry, liquid digestate

LIMAN, Martin. *Výměna hmoty kapalina-pára v procesech stripování*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/131107>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, Ústav chemie materiálů. Vedoucí práce Tomáš Svěrák.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citoval. Diplomová práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího diplomové práce a děkana FCH VUT.

.....
podpis studenta

PODĚKOVÁNÍ

Velmi rád bych poděkoval svému vedoucímu diplomové práce panu prof. Ing. Tomáši Svěrákovi, CSc., za vedení mé práce, podnětné připomínky, odborné konzultace a velmi příjemný lidský přístup. Další dík patří Bc. Jiřímu Lindovskému za poskytnutí fotografií a cenných informací, panu Lubomíru Mišíkovi za skvělou asistenci během měření. Také děkuji rodině, přátelům a známým za skvělou podporu a vynikající studijní zázemí. Děkuji.

Obsah

1	ÚVOD	7
2	TEORETICKÁ ČÁST	8
2.1	PROCES STRIPOVÁNÍ.....	8
2.1.1	Stripovací kolony.....	8
2.2	DESORPCE.....	12
2.2.1	Fyzikální desorpce plynu.....	14
2.2.2	Fyzikální desorpce doprovázena fyzikální absorpcí.....	19
2.2.3	Desorpce doprovázená chemickou reakcí	21
2.2.4	Souběžná desorpce a absorpce s chemickou reakcí.....	23
2.3	AMONIAK VE VODNÉM PROSTŘEDÍ.....	24
2.3.1	Desorpce amoniaku	25
2.3.2	Kinetika desorpce amoniaku	25
2.3.3	Důsledky kinetiky desorpce amoniaku.....	27
2.4	ABSORPCE	27
2.4.1	Absorpce bez chemické reakce.....	28
2.4.2	Absorpce s chemickou reakcí	28
2.5	ANALYTICKÉ METODY STANOVENÍ AMONIAKÁLNÍHO DUSÍKU VE VODNÉM PROSTŘEDÍ	29
2.5.1	Stanovení amoniakálního dusíku spektrofotometricky.....	29
2.5.2	Odměrné neutralizační stanovení amoniakálního dusíku	31
2.5.3	Iontově selektivní elektroda pro stanovení amoniaku	31
2.5.4	Fluorescenční stanovení amoniakálního dusíku	32
3	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	33
3.1	STRIPOVACÍ ZAŘÍZENÍ	33
3.2	FUNKCE EXPERIMENTÁLNÍHO STRIPERU	33
3.3	POSTUPY MĚŘENÍ.....	35
3.3.1	Použité chemikálie.....	35
3.3.2	Použité vybavení.....	38
3.3.3	Kalibrace.....	39
3.3.4	Postup měření na experimentálním zařízení stripelu.....	40
3.3.5	Rozložení měření.....	41
4	VÝSLEDKY A DISKUZE	44
4.1	KALIBRACE ANALYTICKÉ METODY	44
4.1.1	Měření absorpčního spektra.....	44
4.1.2	Měření kinetiky vybarvovací reakce	44
4.1.3	Kalibrační křivka	45
4.2	EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ.....	46
4.2.1	Ověření funkčnosti zařízení s laboratorními vzorky.....	46
4.2.2	Měření s laboratorními vzorky	47
4.2.3	Měření průtoků plynů a složení par za kondenzátorem	48
4.2.4	Měření s fugátem	50

4.2.5	Měření s absorpcí do kyselin	53
4.3	DISKUSE VÝSLEDKŮ	55
4.3.1	Porovnání metody se separací na membránovém kontaktoru	57
5	ZÁVĚR	58
6	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	59
7	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	65

1 ÚVOD

Separální procesy jsou již dlouhodobě základním kamenem mnoha průmyslových a zemědělských výrob. Rozdělování směsí patří k základním technologiím nejen při výrobě prostředků, ale i při využití odpadních materiálů. Separace jedné složky může posunout využití zbytkové směsi mnoha různými směry. Mezi zajímavé separální procesy na bázi výměny hmoty kapalina-plyn patří i stripování, které je založeno na desorpci rozpuštěných plynných složek v původním médiu.

Využití této metody najdeme v průmyslu i zemědělství. A právě na zemědělskou výrobu v kombinaci se zelenou energetikou míří tato diplomová práce. Stripování je zde využito k separaci amoniaku z kejdy, respektive fugátu. Kejda, jakožto produkt hospodářských chovů, je často využívána jako zdroj pro bioplynové stanice nebo jako přírodní organické hnojivo pro výživu rostlin. Fugát je výsledný tekutý odpad z bioplynové stanice. V obou případech může vyšší koncentrace amoniaku vést k negativním výsledkům výrobního a zemědělského úsilí.

Stripování představuje technologický proces, který pozitivně spojuje účinnost, stabilitu a individualizaci přesně na danou problematiku s ekonomickou stránkou řešení.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Proces stripování

Stripování, neboli desorpce, je separační děj opačný k absorpci [1]. Jedná se o fyzikálně-chemický proces separace těkavých látek absorbovaných do kapaliny [2]. Je to proces výměny hmoty kapalina-plyn. Stripování je založeno na vhánění proudu plynu do kapaliny, ze které je separován plyn v ní rozpuštěný. Technologické zařízení pro separaci desorpcí se nazývá stripovací věž (kolona). Kolona je nejčastěji vertikální cylindrická nádoba. Do kolony, která může být například patrová nebo náplňová, je nastříkována kapalina na horní části, zatímco do spodní části kolony je kontinuálně přiváděn stripovací plyn [3], nejčastěji vzduch, spaliny nebo i vodní pára. V tomto případě se často kombinuje s destilací vodní parou [1].

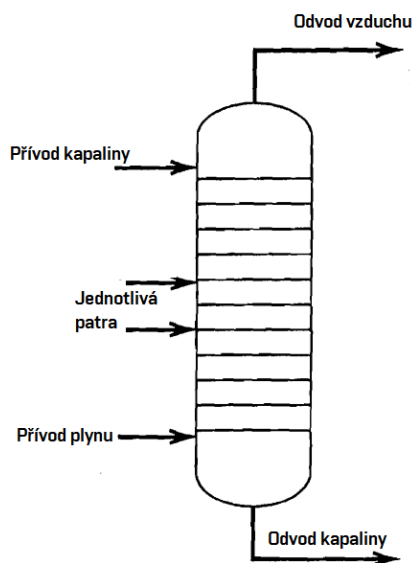
2.1.1 Stripovací kolony

2.1.1.1 Patrová kolona

Kolona je rozdělena několika rošty (tácy) na jednotlivá patra. Plyn proudí ze spodní části věže směrem nahoru a cestou se, jak na roštích, tak i volně, střetává s kapalinou, kterou probublává. Probubláváním dochází k přenosu hmoty mezi kapalinou a plynem. Kapalina proudí do věže z vrchní části. Gravitačně se postupně přes jednotlivé rošty dostává na spodní část věže odkud odtéká ven. Plyn odchází z horní části. Do jednotlivých pater je možno vložit chladicí nebo ohřívací spirály. Kapalinu lze taky z jednotlivých pater odvádět do jiných pater [1].

Patrové kolony jsou zvláště vhodné pro velké instalace, čisté, nekorozivní, nepěnicí kapaliny a aplikace s nízkým až středním průtokem kapaliny. Patrová věž se využívá například při stripování zbytkového toluenu z vody [4]. Avšak častější využití patrových kolon je při destilaci [1].

Jednotlivá patra, respektive oddělující rošty, mohou mít různý tvar a vlastnosti. V praxi se setkáváme s rošty perforovanými, perforovanými s ventily, nebo s bublinovou čepičkou (bublinkové rošty) [1, 5].



Obr. 1 Schéma patrové kolony [1].

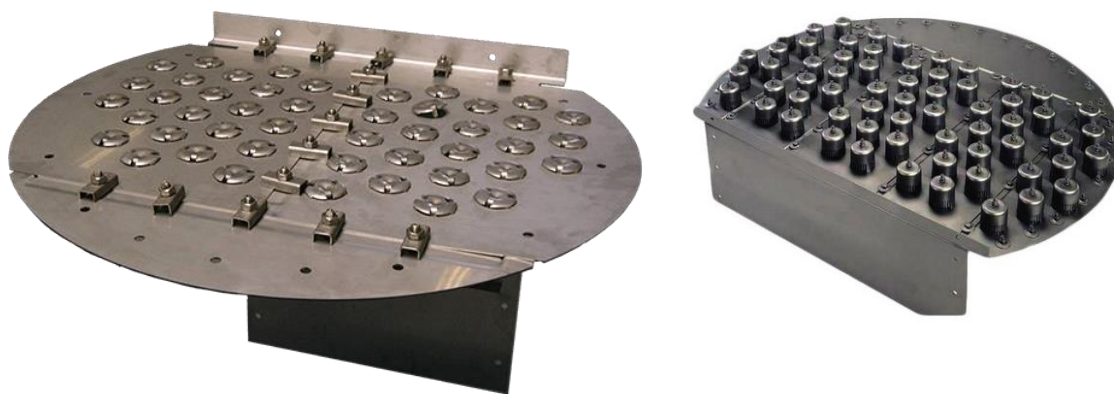
Při použití roštu s ventilem dochází k průtoku plynu do vyššího patra jen od určitého tlaku. Čím větší je tlak plynu, tím více se ventil otevře a tím větší objem plynu proudí do vyšších pater. Tímto principem lze ovlivnit i tvorbu pěny na jednotlivých patrech.

Patro s bublinovou čepičkou (kloboučkové patro) je složeno ze stupačky a krycí čepice, která má po boku vyříznuté drážky. Přes drážky se otáčí plyn a způsobuje tvorbu pěny. V minulosti oblíbený design bublinkových čepiček se nyní používá především pro kolony vyžadující velmi nízký průtok kapaliny [1]. Perforované rošty jsou široce využívány kvůli jejich jednoduchosti a nízké ceně. Ventilové rošty umožňují provoz v širším rozsahu průtoku než jednoduché děrované rošty. Nehrozí u nich ani vysoké zadržování kapaliny na roštích jako na typu roštu s bublinkovou čepičkou.

Konvenční bublinkové uzávěry, perforované a ventilové rošty fungují jako stykače s příčným tokem, ve kterých kapalina proudí vodorovně přes miskou a kontaktuje plyn proudící svisle nahoru otvory v roštu. Kapalina po přetoku podnosem proudí do svodiče, který ji dopravuje na rošt o patro níže. Svod obvykle zabírá 5 až 20 % plochy průřezu kolony [5].

V protiproudých kolonách, které jsou méně využívány než typy s křížovým tokem, kapalina proudí z jednoho zásobníku na další spodní zásobník jako volně padající kapky nebo proudy. Protiproudé kolony jsou účinné, ale postrádají flexibilitu, protože provozní vlastnosti jsou vysoce závislé na rychlostech proudění plynu a kapaliny [5].

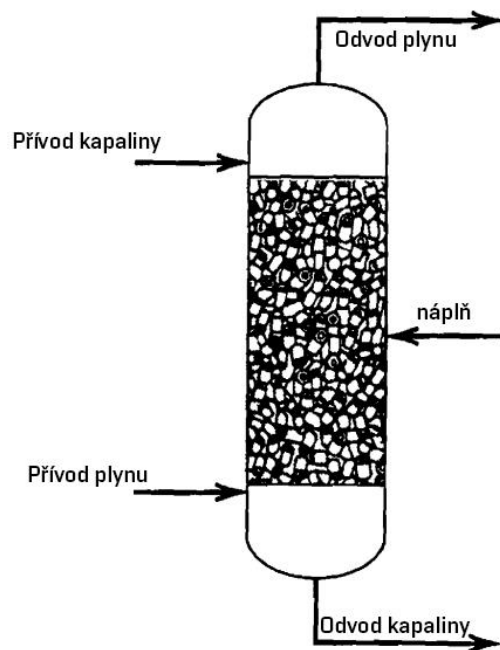
Často jsou protiproudé patrové kolony vybaveny tzv. sloupovými přepážkami nebo sprchovými rošty. Tyto rošty jsou neperforované horizontální nebo mírně svažené plechy, z nichž každý obvykle zabírá něco více než polovinu průřezu věže. Kapalina odtéká z okraje jednoho patra jako clona kapaliny nebo řadou proudů a klesá proudem plynu na podnos níže [1, 5].



Obr. 2 Patro s pohyblivým ventilem [6] a kloboučkové patro [7].

2.1.1.2 Náplňová kolona

Náplňová kolona ve svém vnitřku obsahuje jeden nebo více kusů náplně, takzvané elementy. Náplň se rozumí materiál jehož povrch je smáčen proudem kapaliny. Náplň zvětšuje styčnou plochu mezi kapalinou a plynem, ale taktéž zvětšuje pokles tlaku plynu v koloně. Kapalina je do kolony přiváděna z horní části a plyn je přiváděn ze spodní. Plyn proudí nahoru skrz kapalinu přes náplň. Náplň je ze spodu a ze shora držena sítí tak, aby nedocházelo k jejímu pohybu a unášení. Bylo vyvinuto velké množství tvarů elementů náplně a to z několika různých materiálů [1, 5].



Obr. 3 Schéma náplňové kolony [1].

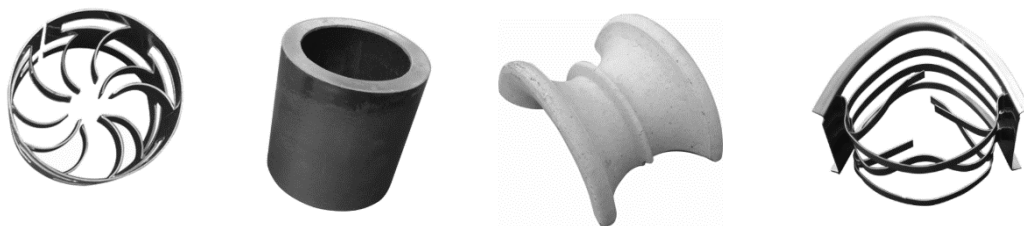
Mezi často využívané materiály patří kov, keramika a plast. Kvůli vynikající pevnosti a dobré smáčivosti se upřednostňují spíše kovové materiály. Keramická náplň má vynikající smáčivost, ale nižší pevnost. Používá se při teplotách kde by selhaly plasty. Plastová náplň, často z polypropylenu, má poměrně dostatečnou pevnost, ale může vykazovat špatnou smáčivost při nízkých průtocích kapaliny. Plastová náplň je ale nejlevnější [1].

Mezi nejpoužívanější tvary náplně patří Rashingovy kroužky a Berlova sedélka. Dříve vyráběna z keramiky. Nyní nahrazena plastovou či kovovou verzí, plastovými Pall kroužky, kovovými Bialeckiho kroužky a keramickými sedly Intalox. Tyto novější varianty poskytují větší plochu pro přestup hmoty, vyšší průtokovou kapacitu a nižší pokles tlaku [1, 5].

Náplň může být v koloně strukturovaná ve formě přesně tvarovaných porézních pater nebo náhodně rozmístěná ve formě jednotlivých kusů elementů. Strukturovaná náplň je podstatně dražší na jednotku objemu než náhodná náplň, avšak vykazuje mnohem menší tlakovou ztrátu a má vyšší účinnost i kapacitu [1, 5].



Obr. 4 Strukturovaná náplň [8].

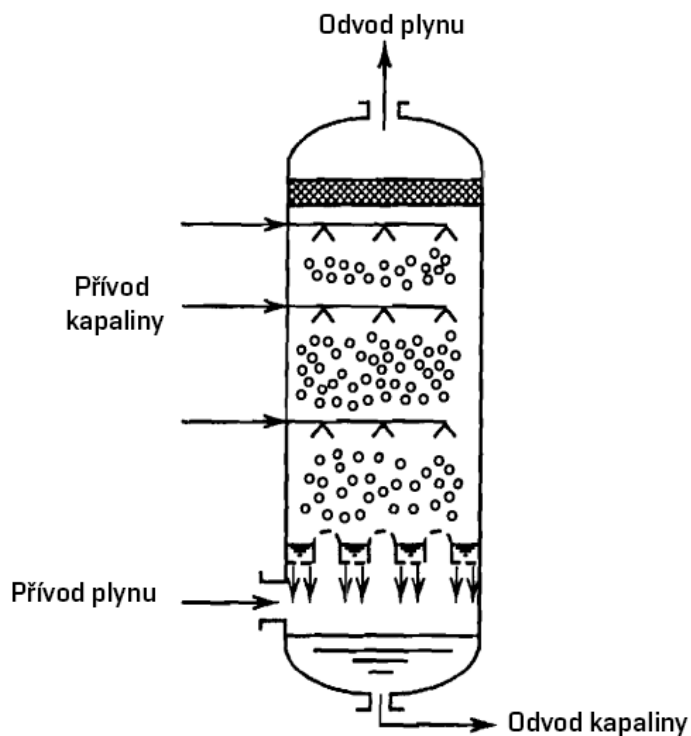


Obr. 5 Pallův kroužek, Rashingův kroužek, moderní verze Berlova sedélka a Medal-Pak [9].

Ve srovnání s patrovými kolonami jsou náplňové kolony zpravidla upřednostňovány pro malá zařízení, korozní provoz, kapaliny se sklonem k pěnění a aplikace, kde je požadován nízký pokles tlaku [5].

2.1.1.3 Sprchová kolona

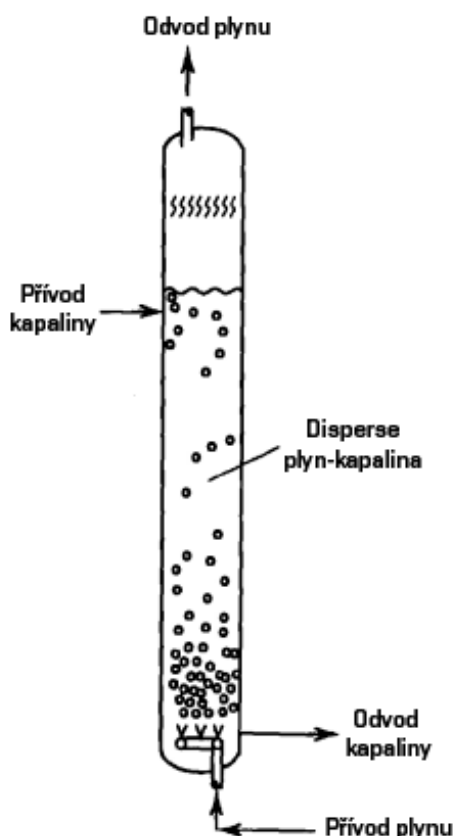
Prázdnou kolonou je rozprašovaná kapalná fáze do proudu fáze plyné. Rozprašování může probíhat buď z jednotlivé trysky, roštu nebo sprch. Rozprašování může probíhat i z vícero pater. Konstrukce může být vertikální i horizontální. Při horizontálním uspořádání, kdy je kolona orientována horizontálně a rozprašovače kapaliny jsou umístěné po celé délce vrchní části zařízení, dochází ke křížení proudu kapaliny a plynu, vzniká tzv. křížový tok. Zařízení je charakteristické poměrně krátkou dobou kontaktu obou fází a nízkou tlakovou ztrátou [1]. Sprchové kolony nejsou účinné pro operace vyžadující více než jednu fázi teoretického kontaktu. Jelikož povrchová plocha pro přenos hmoty ve sprchové koloně je přímo úměrná průtoku kapaliny, je běžnou praxí recyklovat absorbent, aby se zvýšila účinnost desorpce [5].



Obr. 6 Schéma sprchovací kolony [1].

2.1.1.4 Proublávané kolony

Do částečně naplněné kolony je probublávána plynná fáze, která vstupuje do kapaliny ve formě dispergovaných jemných bublin. Pokles tlaku je zde velmi znatelný. Do kolony se může taktéž přidat náplň za účelem lepší distribuce plynu [1, 5]. V kapalině absorbovaná složka proudí do plynné fáze převážně pomocí difuze [10]. Často se do kolony přidává i míchadlo, které zlepšuje styk a distribuci obou fází. Velmi vysokých rychlostí přestupu hmoty dochází pouze při mírně vysokých rychlostech míchání [1].



Obr. 7 Proublávaná kolona [1].

2.2 Desorpce

Desorpce je proces odstraňování plynu z kapalného roztoku. Někdy je proces desorpce doprovázený současnou absorpcí dalších složek. Desorpce může probíhat nejen v systémech kapalina-plyn, ale také v systémech kapalina-plyn-pevná látka (zejména v kašovitých reaktorech) a také v systémech kapalina-kapalina. Desorpci lze rozdělit na čtyři druhy [10]:

- 1) fyzikální desorpce jedné či více komponent
- 2) fyzikální desorpce spojená s fyzikální absorpcí
- 3) desorpce doprovázena chemickou reakcí
- 4) souběžná absorpce a desorpce s chemickou reakcí.

Využití jednotlivých procesů v praxi shrnuje *tabulka 1*.

Tabulka 1 Příklady využití desorpce [10].

Využití	Druh
desorpce SO ₂ , SO ₃ , NH ₃ z odpadních vod	fyzikální desorpce
desorpce CS ₂ , CH ₄ , C ₂ H ₆ , C ₃ H ₈ z olejů	fyzikální desorpce
desorpce CO ₂ z kvasu pomocí proudu vzduchu	fyzikální desorpce spojená fyzikální absorpcí
desorpce vody z polyamidů	desorpce doprovázena chemickou reakcí
desorpce ethyleglykolu z polyesteů	desorpce doprovázena chemickou reakcí
desorpce CO ₂ z uhličitánových roztoků při simultánní absorpci SO ₂	souběžná absorpce a desorpce s chemickou reakcí

K desorpci plynné složky dochází, když je parciální tlak plynné složky v kapalině vyšší než parciální tlak na rozhraní kapalina-plyn na straně plynu. K desorpci dochází i když je parciální tlak plynné složky v kapalině vyšší než celkový tlak v plynné fázi. Dokud není překročena mez celkového tlaku, desorpční proces je plně difuzní a v některých ohledech může být považován za zrcadlový obraz absorpčního procesu. Po překročení celkové tlakové bariéry je kapalná fáze přesycena rozpuštěným plynem (tzv. supersaturace) a může začít nukleace plynových bublin [10, 11].

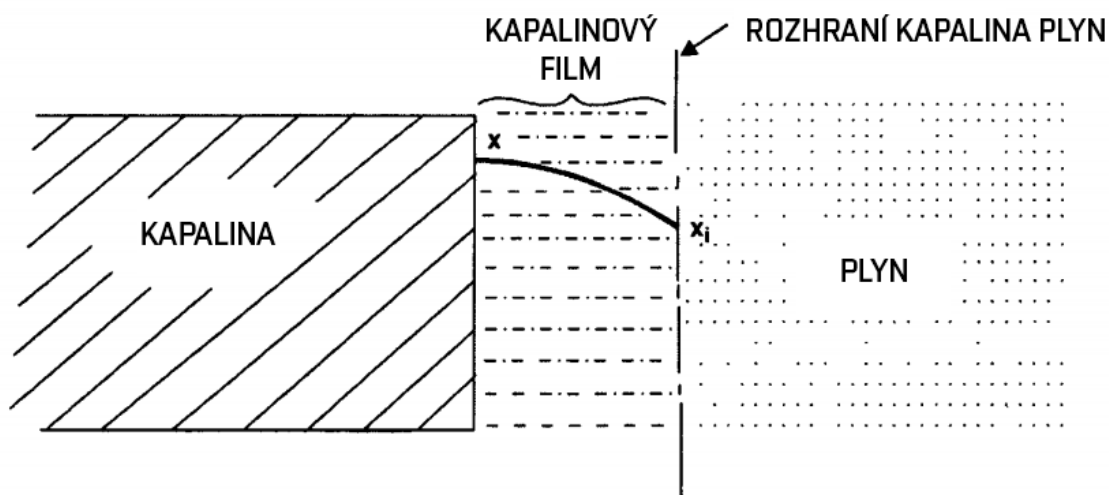
Desorpční procesy mají pouze difuzní povahu pod určitou kritickou úrovní přesycení roztoku. Nad touto hodnotou se k difúzi přidává mechanismus nukleace plyných fází. Růst plynových bublin v kapalině může částečně změnit hydrodynamické podmínky v této fázi (zvýšení turbulence, destrukce mezní vrstvy atd.) a tímto způsobem zesílit difúzní přenos hmoty. V důsledku nukleace se mění také oblast přestupu hmoty přístupná mechanismu difúzního transportu složek. To znamená, že za takových podmínek nelze desorpci považovat za jednoduchou inverzi absorpce [10].

Přesycení kapalné fáze může být výsledkem úmyslného působení nebo k ní může dojít spontánně. V prvním případě může být přesycení příčinou prudkého proplachování plynem nebo přehřátí kapalné fáze. V případě proplachování nebo přehřátí dochází k přesycení v celém objemu roztoku. Dostatečně velký pokles vnějšího tlaku nebo zvýšení teploty způsobí znatelné snížení rozpustnosti plynu v kapalné fázi. v tomto případě je snadné určit přesycení roztoku, protože to vyplývá ze změn rovnovážných podmínek na rozhraní kalina-plyn. V tomto ohledu obě metody desorpce, proplachování a přehřátí kapaliny, odhalují podobnost mechanismů a hnacích sil přenosu hmoty. Spontánního přesycení se objevuje v procesech souběžné fyzikální absorpce a desorpce, chemické desorpce a souběžné chemické absorpce a desorpce. Jedná se o lokální jev, vyskytuje se tedy pouze v určité oblasti kapalné fáze, ve které součet parciálních tlaků těkavých složek, které jsou výsledkem jejich přítomnosti v roztoku, převyšuje celkový tlak plynné fáze. To je případ, kdy po chemické reakci vznikne v kapalině plyný produkt s nízkou rozpustností a difuzivitou v kapalné fázi. Podobně bude supersaturace probíhat v procesu simultánní fyzikální absorpce a desorpce, pokud má desorpční složka mnohem nižší mobilitu v kapalné fázi ve srovnání s absorbovanou složkou [10].

Obecně je proces desorpce nejlépe známý v oblasti difúzního přenosu. Přestupu hmoty nukleačně-difúzním principem, však není dosud dobře popsán a neexistuje žádná teorie při popisu desorpce tímto mechanismem. To se mimo jiné týká vlivu různých faktorů na kritickou hodnotu supersaturace, vztah úrovně přesycení a rychlosti desorpce, role promotorů nukleace atd. [10].

2.2.1 Fyzikální desorpce plynu

Fyzikální desorpce je opakem fyzikální absorpce a principem je mechanismus difúze. V binárních směsích, ve kterých je jedna složka absorbována, přestupuje hmota složky *A* přes inertní složku *B* [10, 12]. Tento proces je popsán filmovou teorií difuze. Látka *A* proudí ze strany filmu, která je koncentrovanější, na stranu která je méně koncentrovaná viz *obr. 8*.



Obr. 8 Koncentrační gradient jako hnací síla desorpce [12].

Přes formální podobnost mezi absorpcí a desorpcí lze v obou procesech pozorovat významné rozdíly. Míra desorpce je za podobných podmínek asi o 20 % nižší než míra absorpce. Na rozdíl od fyzikální absorpce, dochází u desorpce k Marangoniho efektu. Při Marangoniho efektu dochází ke zvýšení proudění v kapalině díky gradientu povrchového napětí. Zvýšená náchylnost systému k napěnění by měla také pozitivně ovlivnit přestup hmoty v důsledku zvýšené mezifázové plochy [12].

Další rozdíl spočívá v tepelných dějích. Absorpce je exotermní proces, zatímco desorpce je endotermní. Teplota povrchu kapaliny během absorpce je vyšší než teplota směrem do středu kapaliny. U desorpce je tomu opačně [12].

2.2.1.1 Henryho zákon

V rovnováze se fugacita složky v plynu rovná fugacitě stejné složky v kapalině. Toto termodynamické kritérium definuje vztah mezi rovnovážnou koncentrací složky v plynu a její koncentrací v kapalině. Množství plynu rozpuštěného v daném množství rozpouštědla za rovnovážných podmínek se často označuje jako rozpustnost plynu. Přítomnost rozpuštěného plynu v kapalině je řízena Henryho zákonem [13]. Protože se tato práce zabývá rovnováhami v systémech s amoniakem, budou příklady jednotlivých problematik vztaženy přímo na amoniak.

Henryho zákon říká, že množství rozpuštěného plynu do kapalné fáze je přímo úměrné jeho parciálnímu tlaku v plynné fázi nad roztokem. Rovnováha mezi plynnou složkou a její kapalinou je dynamická. Ve stejném čase se absorbuje a desorpuje stejné množství molekul [11, 14].

$$P_A = H \cdot x_A \quad 2.1$$

kde P_A parciální tlak absorbované složky A v plynné fázi (Pa)
 x_A molový zlomek absorbované složky a v kapalné fázi (–)
 H Henryho konstanta (Pa)

Pokud je dosaženo rovnováhy, dá se Henryho konstanta vyjádřit pro systém amoniaku ve vodě jako [17]:

$$H = \frac{C_{NH_3g}}{C_N \cdot \delta_{NH_3}} \quad (2.2)$$

kde C_{NH_3g} koncentrace v plynné fázi nad kapalinou ($\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$)
 C_N koncentrace amoniakálního dusíku v kapalině ($\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$)
 δ_{NH_3} podíl NH_3 v kapalné fázi (–)

Henryho zákon je závislý na teplotě a tlaku. Obecně lze říct, že závislost na tlaku je poměrně zanedbatelná a nevýznamná oproti závislosti na teplotě [14]. Termodynamicky vyjádřena závislost Henryho zákona na teplotě:

$$\left(\frac{\partial \ln H}{\partial T} \right)_p = \frac{\Delta_{rozph}}{RT^2} \quad (2.3)$$

kde Δ_{rozph} změna entalpie jednotkového látkového množství složky při jejím přechodě ze stavu ideálního plynu do nekonečně zředěného kapalného roztoku. ($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$)

R univerzální plynová konstanta ($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
 T termodynamická teplota (K)

V daném teplotním intervalu uvažujeme hodnotu diferenciální rozpouštěcí teplo plynné složky v nekonečně zředěném kapalném roztoku (Δ_{rozph}) jako konstantní, můžeme rovnici (2.3) integrovat [14]:

$$\ln H = \frac{\Delta_{rozph}}{RT} + I_H \quad (2.4)$$

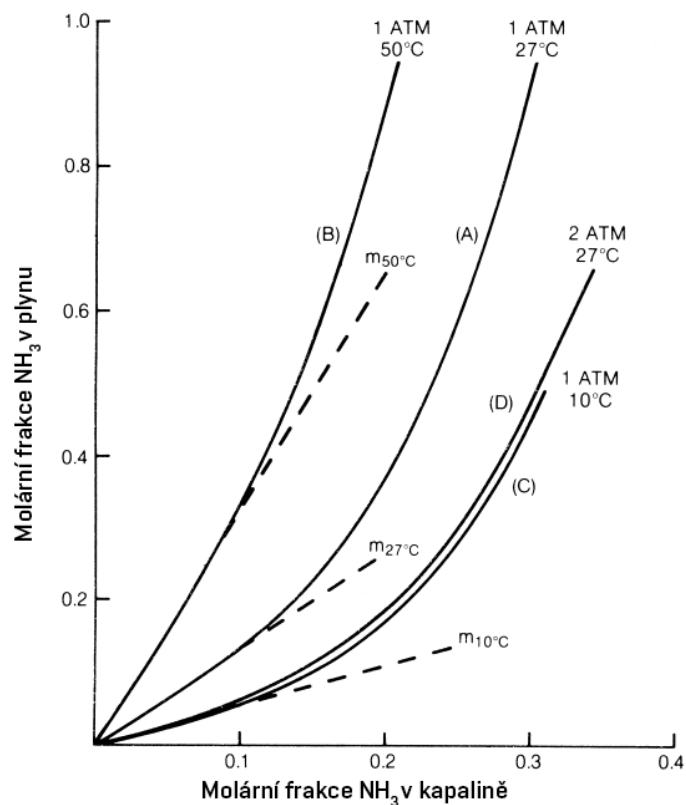
kde I_H integrační konstanta (–)

po úpravě:

$$H = k \cdot e^{\left(\frac{\Delta_{rozph}}{RT} \right)} \quad (2.5)$$

Z podmínky rovnice (2.5) vyplývá, že Henryho zákon je v praxi převážně platný pouze pro málo rozpustné plyny (nekonečně zředěný roztok). Pro dobře rozpustné plyny se používají praxí naměřená data. Avšak lze poukázat na fakt, že s rostoucí teplotou klesá rozpustnost plynů [14]. Jinak řečeno, s rostoucí teplotou roste desorpce.

Rozpustnost amoniaku ve vodném prostředí je znázorněna na obrázku 9.



Obr. 9 Rozpustnosti NH_3 ze vzduchu do vody [13].

Rovnovážná křivka je lineárně aproximovaná [13]

$$y_{\text{NH}_3} = x_{\text{NH}_3} \cdot m \quad (2.6)$$

kde y_{NH_3} koncentrace NH_3 v plynné fázi ($\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$)
 m rovnovážná konstanta (–)

Konstanta m je dána teplotou a tlakem. Tento vztah je platný pouze pro nízké koncentrace. Pro roztoky, které jsou termodynamicky ideální platí [13]:

$$m = p_{\text{vap}} \cdot P \quad (2.7)$$

kde p_{vap} tlak par (Pa)
 P celkový tlak (Pa)

Pokud se složení plynné fáze vyjádří v parciálním tlakem, platí Henryho zákon nebo [13]:

$$H = \frac{m}{P} \quad (2.8)$$

2.2.1.2 Difuze

Mějme koncentrační profil látky A (obr. 10) difundující z koncentrovanějšího ($z \leq 0$) do řidšího prostředí ($z = l$) přes tenký film, kde z je vzdálenost. Hledáme-li profil koncentrace rozpuštěných látek a tok napříč tímto filmem, musíme napsat hmotnostní bilanci pro tenkou vrstvu δz , která se nachází v libovolné poloze z uvnitř tenkého filmu. Hmotnostní bilance v této vrstvě je [9, 11, 13, 15]:

$$(akumulace) = (difuze\ dovnitř) - (difuze\ ven)$$

Adolf Fick definoval jednosměrný difuzní tok J_1 jako [15]:

$$J_1 = Aj_1 = -AD \frac{\partial c_1}{\partial z} \quad (2.9)$$

kde A oblast ve které dochází k difuzi (m^2)
 j_1 tok na jednotku plochy ($mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)
 D difuzí koeficient ($m^2 \cdot s^{-1}$)
 c_1 koncentrace látky uvnitř filmu ($mol \cdot dm^{-3}$)
 z vzdálenost (m)

Výraz $-D\partial c_1/\partial z$ je brán jako rychlost vstupujícího elementu látky, čili změna koncentrace látky se změnou vzdálenosti. Jedná se tudíž i o vyjádřená hnací síly difuze. Rychlost vystupující látky je definována jako [11, 15, 16]:

$$-D \left(\frac{\partial^2 c_1}{\partial z^2} + \Delta z \frac{\partial^2 c_1}{\partial z^2} \right) \quad (2.10)$$

kde Δz změna vzdálenosti uvažovaného bodu (m)

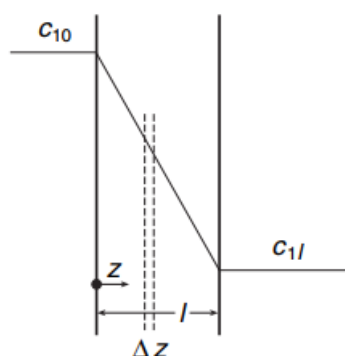
Bilanci lze uzavřít, jestliže rychlost akumulace je rovna rychlosti vzrůstu koncentrace násobené objemem filmu [11, 16]:

$$-D \frac{\partial c_1}{\partial z} + D \left(\frac{\partial^2 c_1}{\partial z^2} + \Delta z \frac{\partial^2 c_1}{\partial z^2} \right) = \Delta z \frac{\partial c_1}{\partial \tau} \quad (2.11)$$

kde τ čas (s)

Úpravou této rovnice dostaneme druhý Fickův zákon, který charakterizuje změny koncentrace látky na čase a vzdálenosti z [15, 16]:

$$\frac{\partial c_1}{\partial \tau} = D \frac{\partial^2 c_1}{\partial z^2} \quad (2.12)$$



Obr. 10 Koncentrační profil látky a o koncentraci c difundující skrz tenký film. Směr difuze je z koncentrovanějšího prostředí (kapalina) do řidšího (plyn) [15].

Uvažujme, že je proces ustálený a akumulace nulová. Rychlost difuze je rovna difusnímu toku násobenému plochou filmu A_f [15]:

$$0 = A_f (j_1|_z - j_1|_{z+\Delta z}) \quad (2.13)$$

kde A_f plocha filmu (m^2)

$j_1|_z$ tok v koordinátě z od hranice filmu ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
 $j_1|_{z+\Delta z}$ tok v koordinátě $z + \Delta z$ od hranice filmu ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

Podělením objemem filmu, $A\Delta z$ a úpravou dostáváme [15]

$$0 = \left(\frac{j_1|_z - j_1|_{z+\Delta z}}{(z + \Delta z) - z} \right) \quad (2.14)$$

Pokud bude Δz velmi malé:

$$0 = -\frac{d}{dz} j_1 \quad (2.15)$$

Kombinací s Fickovým zákonem:

$$D \frac{dc_1}{dz} = -j_1 \quad (2.16)$$

nacházíme pro konstantní difuzní koeficient D :

$$D \frac{d^2 c_1}{dz^2} = 0 \quad (2.17)$$

kde c_1 koncentrace látky 1 uvnitř filmu ($\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$)

Tato rovnice má dvě okrajové podmínky a to, pokud $z = 0$, pak $c_1 = c_{10}$. Druhá podmínka: $z = l$, pak $c_1 = c_{1l}$. Protože je systém v ustáleném stavu, koncentrace c_{1l} a c_{10} jsou časově nezávislé. Jinak řečeno, objemy fází na rozhraní musí být mnohokrát větší než objem filmu [15].

Dvojitou integrací rovnice se dostáváme k požadovanému koncentračnímu profilu a toku:

$$c_1 = a + bz \quad (2.18)$$

Z okrajových podmínek rovnice (2.17) se vyjádří konstanty a a b , koncentrační profil je pak roven [15]:

$$c_1 = c_{10} + (c_{1l} - c_{10}) \cdot \frac{z}{l} \quad (2.19)$$

kde c_{10} koncentrace látky 1 na jedné straně filmu ($\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$)

c_{1l} koncentrace látky 1 na druhé straně filmu ($\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$)

z vzdálenost (m)

l šíře filmu (m)

Lineární tok je roven [15]:

$$j_1 = -D \cdot \frac{dc_1}{dz} = \frac{D}{l} (c_{10} - c_{1l}) \quad (2.20)$$

Definujme molární fraksi jako poměr molů i -té složky k celkovému počtu molů všech složek ve směsi, x_i je pak rovno [10]:

$$x_i = \frac{c_i}{c} \quad (2.21)$$

kde c celková koncentrace ($\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$)

Zjednodušením o koeficient přestupu hmoty k a zavedením N jako molárního toku dostáváme rovnice molárního toku difundující látky v plynné fázi a kapalně fázi [10]:

$$N_{Ag} = k_{Ag} \cdot C_{Ag} \cdot (y_A^\delta - y_A^*) \quad (2.22)$$

$$N_{Al} = k_{Al} \cdot C_{Al} \cdot (x_A^* - x_A^\delta) \quad (2.23)$$

kde	N_{Al}, N_{Ag}	molární tok látky a v kapalině, respektive v plynné fázi ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
	k_{Al}, k_{Ag}	koeficient přestupu hmoty látky A v kapalině, respektive v plynné fázi ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
	C_{Al}, C_{Ag}	molární koncentrace látky A v kapalině, respektive v plynné fázi ($\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$)
	x_A^∂, x_A^*	molární frakce látky A v kapalině, respektive na rozhraní kapalina-plyn (-)
	y_A^∂, y_A^*	molární frakce látky A v plynné fázi, respektive na rozhraní plyn-kapalina (-)

2.2.1.3 Fyzikálně matematický aparát fyzikální desorpce

Molární tok pro látku A v kapalně fázi je pro fyzikální desorpci popsán [10]:

$$N_{Al} = k_{Al} \cdot C_{Al} \cdot \ln \frac{1 - x_A^\partial}{1 - x_A^*} \quad (2.24)$$

Koncentrační profil látky a prostupující filmem se může pro fyzikální desorpci vypočítat podle [10]:

$$x_A = 1 - (1 - x_A^*) \cdot e^{\left(\frac{-N_{Al} \cdot z}{C_L \cdot D_{Al}}\right)} \quad (2.25)$$

Kde	x_A	molární frakce látky A (-)
	D_{Al}	difuzní koeficient látky A ve filmu ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)

2.2.2 Fyzikální desorpce doprovázena fyzikální absorpcí

Molární tok při souběžné desorpci a absorpci lze napsat jako [10]:

$$N_{Al} = C_l \cdot \beta_l \cdot k_{Al} (x_A^* - x_A^\partial) + N_{tl} \cdot x_A^\partial \quad (2.26)$$

kde	N_{Al}, N_{tl}	molární tok kapalně fáze složky A, respektive celkový molární tok kapalně fáze ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
	C_l	koncentrace kapalně fáze ($\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$)
	β_l	objemová frakce v kapalně fázi (-)
	k_{Al}	koeficient přestupu hmoty složky A v kapalině ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

Rovnice je podobná rovnicím popisující buď absorpci nebo desorpci. Avšak bylo prokázáno, že při souběžném procesu může dojít k jevu supersaturace. Tedy, že parciální tlak plynů rozpuštěných v kapalině překročí tlak plynu na povrchu kapaliny. Pro plyny splňující Henryho zákon lze tuto podmínku zapsat pomocí [10]:

$$\pi(x) = \frac{\sum_i \frac{C_{iL}(x)}{H_i(T)}}{P} - 1 > 0 \quad (2.27)$$

kde	$\pi(x)$	supersaturační funkce (-)
	$C_{iL}(x)$	koncentrace i -té složky v kapalině ve vzdálenosti x od rozhraní ($\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$)
	$H_i(T)$	Henryho konstanta i -té složky při teplotě T ($\text{Pa}^3 \cdot \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$)

Celkový tlak plynné fáze zahrnuje parciální tlaky plynů rozpuštěných v kapalně fázi a parciální tlaky inertních látek existujících v plynné fázi [10]:

$$P = \sum_i \frac{C_{iL}^*}{H_i(T)} + \sum_i P_i^* \quad (2.28)$$

kde C_{iL}^* koncentrace i -té složky na rozhraní na kapalné straně ($\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$)
 P_i^* tlak i -té složky na rozhraní plyn-kapalina (Pa)

Z nerovnosti (2.27) vyplývá, že dostatečně velký pokles celkového tlaku nad kapalnou fází musí vždy vést k splnění podmínky přesycení v celém objemu kapaliny. Podobného efektu je dosaženo i při zvýšené teplotě, při které jsou hodnoty Henryho konstant vyšší. Pokud bude teplota a vnější tlak konstantní, může dojít k přesycení pouze v důsledků změn koncentračních profilů rozpuštěných látek v kapalně fázi [10].

Stanovení funkce přesycení je možné pouze po výpočtu koncentračních profilů složek v kapalně fázi. Kritéria pro přesycení lze odvodit pomocí filmového nebo penetračního modelu. Podmínkou nastolení jevu je přesycení alespoň v jednom bodě kapaliny. Výsledkem této definice může být funkce přesycení $\pi(x)$ v celé oblasti nahrazena analýzou jejího maxima [10].

Obecné analytické podmínky pro přesycení kapalného filmu [18]:
 podmínka nutná pro lokální extrém v bodě $x = x_m$:

$$\left(\frac{d\pi}{dx}\right)_{x=x_m} = 0 \quad (2.29)$$

Podmínka pro lokální maximum:

$$\left(\frac{d^2\pi}{dx^2}\right)_{x=x_m} < 0 \quad (2.30)$$

Podmínka pro pozitivní maximum [10]:

$$\pi(x) > 0 \quad (2.31)$$

Tyto podmínky jsou použity pro parametry charakterizující systémy plyn-kapalina, čili pro difúzní koeficienty, Henryho konstanty, kinetické konstanty chemických reakcí a koncentrací složek v kapalině [10, 18].

Při penetračním modelu nastává supersaturace tehdy, když máme absorpci látky B a desorpci látky A a jejich vlastnosti splňují [10]:

$$D_{AL} > D_{BL} \quad (2.32)$$

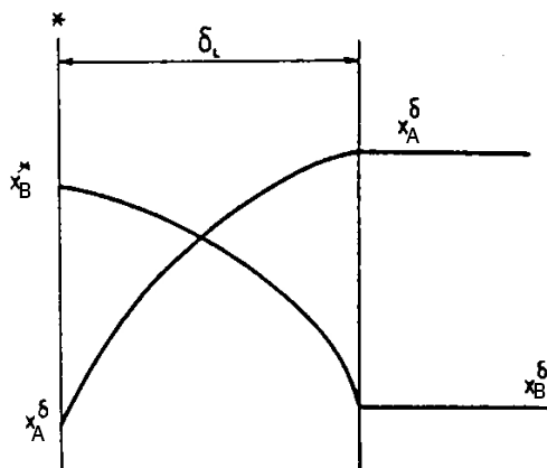
kde D_{AL}, D_{BL} difúzní koeficient látky A , resp. B , v kapalně fázi ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)

a

$$\frac{(C_{BL}^* - C_{BL}^\delta)}{(C_{AL}^\delta - C_{AL}^*)} \cdot \frac{H_A}{H_B} \cdot \sqrt{\frac{D_{AL}}{D_{BL}}} < 1 \quad (2.33)$$

kde C_{BL}^*, C_{BL}^δ koncentrace látky B , respektive A , na rozhraní plyn-kapalina, respektive v kapalně fázi ($\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$)
 H_A, H_B Henryho konstanta pro složku A , respektive B ($\text{Pa}^3 \cdot \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$)

Pro filmový model platí podmínka (2.32). Pro výpočet uvažujme koncentrační profil:



Obr. 11 Koncentrační profil desorbované látky A a absorbované látky B [10].

Pak pro splnění podmínky (2.32) definujeme difuzní toky [10]:

$$N_{A,L} = k_{A,L} \cdot C_L \cdot \ln \frac{1 - x_A^\partial}{1 - x_A^*} \quad (2.34)$$

$$N_{B,L} = k_{B,L} \cdot C_L \cdot \ln \frac{1 - x_B^\partial}{1 - x_B^*} \quad (2.35)$$

Pokud v plynné fázi není přítomna žádná inertní složka a směs je nasycena na obou koncích filmu, musí dojít k přesycení [10].

Podmínky přesycení mohou být popsány nestabilní rovnováhou plynových bublin o kritickém průměru d_{pk} . Bubliny o průměru menším kritickému mají tendenci se znovu rozpouštět v kapalně fázi a bubliny větších průměrů, vedou k nepřetržitému růstu vedoucímu k tvorbě jader plynné fáze v přesycené kapalině. Náhlé zvýšení rychlosti nukleace nastává po překročení limitu kritického přesycení π . Přítomnost dalších promotorů nukleace obvykle způsobuje významné snížení kritické hodnoty π . Zatím nebyla vyvinuta uspokojivá teorie nukleačně-difuzní desorpce. Celková míra desorpce se proto stanoví jako součet rychlosti přestupu hmoty difuzí a nukleací. Obecně je přestup s nukleací větší než jeho hodnota při desorpci bez nukleace. Tento rozdíl vyplývá ze zvýšení turbulence v kapalně fázi v důsledku vytváření plynových bublin [10, 18].

2.2.3 Desorpce doprovázená chemickou reakcí

Tento typ desorpce je jedním z nejčastějších a nejdůležitějších případů v průmyslové praxi, zejména při regeneraci absorbentů a výrobě polymerů. Rozdíl mezi chemickou absorpcí a desorpcí vyplývá hlavně ze skutečnosti, že v absorpčních procesech se zajímáme o substráty, zatímco v desorpci jsou důležité produkty reakce [10].

Jev lze rozdělit do několika dějů [10, 19]:

1. absorpce substrátu do kapaliny,
2. reakce substrátu s kapalinou za vzniku těkavého produktu A a netěkavého produktu a to buď ve filmu nebo v podstatné části kapaliny,
3. desorpce A do plynné fáze.

Samotná reakce je nejčastěji vratná. Lze ji pospat jako [10]:

substrát ↔ netěkavý produkt + plynný produkt

Bez ohledu na počet reakcí a počet složek (i) přítomných v kapalně fázi je však kinetika procesu popsána rovnicí [10]:

$$D_{iL} \frac{d^2 C_{iL}}{dx^2} = - \sum_j^r v_{ij} r_j; \quad (i = 1, \dots, n-1) \quad (2.36)$$

kde r molární rychlost chemické reakce ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

Okrajové podmínky pro desorbující látku:

$$x = 0; \quad C_{iL} = C_{iL}^*; \quad (i = 1, \dots, k) \quad (2.37)$$

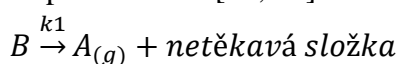
$$x = l; \quad C_{iL} = C_{iL}^\delta; \quad (i = 1, \dots, k) \quad (2.38)$$

Okrajové podmínky pro netěkavý produkt [10, 19]:

$$x = 0; \quad \frac{dC_{iL}}{dx} = 0; \quad (i = k+1, \dots, n-1) \quad (2.39)$$

$$x = \delta_L; \quad C_{iL} = C_{iL}^\delta; \quad (i = k+1, \dots, n-1) \quad (2.40)$$

Mějme substrát B ze kterého chemickou reakcí vzniká plynná složka A a netěkavý produkt. Pro nevratnou reakci prvního řádu platí schéma [10, 19]:



kde k_1 rychlostí konstanta nevratné reakce ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$).

Hmotností bilance pro filmový model [10]:

$$D_{B,L} \frac{d^2 C_{BL}}{dx^2} = k_1 C_{B,L} \quad (2.41)$$

$$D_{A,L} \frac{d^2 C_{A,L}}{dx^2} = -k_1 C_{A,L} \quad (2.42)$$

Okrajové podmínky [10]:

$$x = 0; \quad \frac{dC_{BL}}{dx} = 0; \quad C_{A,L} = C_{A,L}^* \quad (2.43)$$

$$x = l; \quad C_{B,L} = C_{B,L}^\delta; \quad C_{A,L} = C_{A,L}^\delta \quad (2.44)$$

Pro další popis chemické desorpce je potřeba definovat bezrozměrná kritéria. Zavedeme kritérium M_B , které označuje poměr maximální možné rychlosti reakce složky B ve filmu k maximální možné rychlosti přenosu této hmoty [10].

$$M_B = \frac{k_1 \delta_L}{k_{B,L}} \quad (2.45)$$

Další kritérium potřebné pro popsání chemické desorpce je ϕ , které popisuje poměr mezi koncentrací látky v jedné fázi a koncentrací stejné látky na rozhraní filmu. Kritérium je bezrozměrné [10].

$$\phi_B = \frac{C_{B,L}}{C_{B,L}^\delta} \quad (2.46)$$

$$\phi_A = \frac{C_{A,L}}{C_{A,L}^\delta} \quad (2.47)$$

Délkové kritérium s popisuje poměr polohy x k délce filmu:

$$s = \frac{x}{\delta_L} \quad (2.48)$$

Posledním potřebným kritériem je q , bezrozměrný koeficient přestupu hmoty [10]:

$$q = \frac{k_{B,L} \cdot C_{A,L}^\delta}{k_{A,L} \cdot C_{A,L}^\delta} \quad (2.49)$$

Vzájemnou transformací kritérii dostáváme:

$$\frac{d^2 \phi_B}{ds^2} = M_B \phi_B \quad (2.50)$$

$$\frac{d^2 \phi_A}{ds^2} = -q M_B \phi_B \quad (2.51)$$

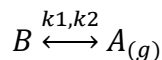
S okrajovými podmínkami:

$$s = 0 ; \phi_A = \phi_A^* ; C_{A,L} = C_{A,L}^* \quad (2.52)$$

$$s = 1 ; \phi_B = 1 ; \phi_A = 1 \quad (2.53)$$

Z kritérii je patrné několik věcí. Jeli kritérium $M < 1$, nastává čistá difuze skrz kapalinový film bez výraznější chemické reakce. Lze tedy usuzovat, že ve filmu nedochází k reakci a substrát se rozpadá na tekavou a netekavou složku až v kapalině. Tato reakce by tudíž neměla mít prakticky významnou roli na rychlost desorpce (v porovnání s desorpcí bez chemické reakce). v opačném případě, tedy $M > 1$, dochází k reakci již v kapalinovém filmu. Kritérium q vypovídá o koncentračním profilu jednotlivých složek a lze jej aplikovat jak pro komponent B tak i A . Při hodnotách blízkým nekonečnu, jsou hodnoty lineárně klesající, respektive stoupající. Při $q = 0$, je koncentrační profil konstantní [10, 19].

Rozšíření na zpětnou reakci [10]:



Hmotností bilance pro filmový model:

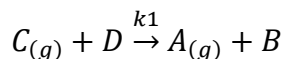
$$D_{B,L} \frac{d^2 C_{BL}}{dx^2} = k_1 C_{B,L} - k_2 C_{A,L} \quad (2.54)$$

$$D_{A,L} \frac{d^2 C_{A,L}}{dx^2} = -k_1 C_{A,L} + k_2 C_{A,L} \quad (2.55)$$

Hodnocení kritérií je obdobné jak při nevratné reakci. Avšak protože se zde kombinují oba směry reakce, je těžké určit, pro který směr je jaká rychlost reakce charakteristická [10].

2.2.4 Souběžná desorpce a absorpce s chemickou reakcí

Uvažujme případ, kdy současná absorpce složky C a desorpce složky A doprovázené chemickou reakcí probíhá při reakci v kapalně fázi. Tento případ je nejčastější. Rovnice děje se zapíše [10, 20]:



Kritérium M pro tento případ se vypočte [10]:

$$M_A = \frac{k_1 \cdot C_{C,L}^* \cdot C_{D,L}^\delta \cdot \delta_L}{k_{A,L} \cdot C_{A,L}^\delta} \quad (2.56)$$

Difúzní koeficienty netekavých látek D a B , jsou obvyklé stejné stejně jako koeficienty pro látky C a A . I v tomto systému může dojít k přesycení podle kritéria M [10].

2.3 Amoniak ve vodném prostředí

Amoniak (NH_3) je ve vodném prostředí z části, či úplně, disociován na svůj kationt NH_4^+ a to na základě hodnoty pH [21].

Rovnice rovnováhy:



Suma amoniaku a amonného kationtu vztažena na dusík se nazývá celkový amoniakální dusík. Zastoupení jednotlivých forem ve vodném prostředí je vyjádřeno na základě konstanty bazicity amoniaku. Amonný kationt je vázán na vodné prostředí, zatímco neutrální amoniak je nevázaný a k jeho desorpci dochází volně [21].

Zastoupení NH_4^+ :

$$\delta_{\text{NH}_4^+} = \frac{H^+}{H^+ + K_{\text{BH}^+}} \quad (2.58)$$

zastoupení NH_3 :

$$\delta_{\text{NH}_3} = \frac{K_{\text{BH}^+}}{H^+ + K_{\text{BH}^+}} \quad (2.59)$$

kde $\delta_{\text{NH}_4^+}, \delta_{\text{NH}_3}$ zastoupení NH_4^+ , respektive NH_3 (–)
 H^+ koncentrace H^+ iontů z hodnoty pH ($\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$)
 K_{BH^+} konstanta bazicity (–)

Přepoččet koncentrace dusíku na čistou formu amoniaku nebo kationtu se odvíjí od poměru molekulových hmotností. Příklad přepočtu uvádí *tabulka 1*.

Tab. 1 Převod koncentrací mezi čistým dusíkem, amoniakem a amonným kationtem [22].

	$\text{C}_{\text{dusík}} (\text{g} \cdot \text{dm}^{-3})$	$\text{C}_{\text{NH}_3} (\text{g} \cdot \text{dm}^{-3})$	$\text{C}_{\text{NH}_4^+} (\text{g} \cdot \text{dm}^{-3})$
$\text{C}_{\text{dusík}} = 1 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3}$	1	1,216	1,288
$\text{C}_{\text{NH}_3} = 1 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3}$	0,823	1	1,059
$\text{C}_{\text{NH}_4^+} = 1 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3}$	0,777	0,944	1

Definujme F jako poměr nedisociovaného amoniaku k celkovému amoniakálnímu dusíku, pak [21]:

$$F = \frac{\text{nedisociovaná forma}}{\text{celkový amoniakální dusík}} = \frac{10^{\text{pH}}}{\frac{k_b}{k_w} + 10^{\text{pH}}} \quad (2.60)$$

Kde k_b ionizační konstanta amoniaku ve vodě (–)
 k_w ionizační konstanta vody (–)

Závislost pk_b na teplotě [23]:

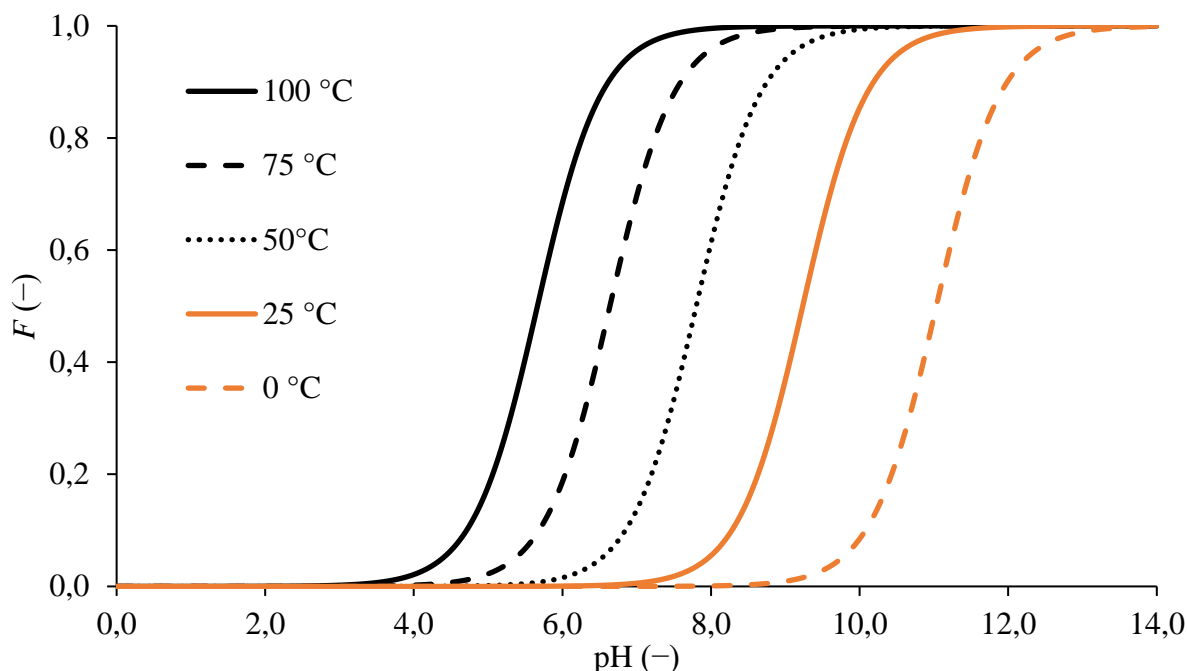
$$\text{pk}_b = 14 - \left(\frac{4390,82}{T} + 23,9744 \log T - 0,0160935T - 60,0072 \right) \quad (2.61)$$

Kde T teplota (K)

Závislost k_w na teplotě [23]:

$$k_w = \frac{5839,5}{T} + 22,4773 \log T - 61,2062 \quad (2.62)$$

Se zvyšující se teplotou při stejném pH, roste zastoupení amoniakální formy NH_3 [21]. Obdobný proces platí i se zvyšující se tlakem [24]. Závislost F na pH při různých teplotách znázorňuje obr. 12.



Obr. 12 Závislost F na pH při různých teplotách.

Je patrné, že pro lepší fungování desorpce je výhodné zvýšení teploty. Při teplotě 25 °C je většina amoniakálního dusíku ve formě NH_3 až od pH 12, při teplotě 75 °C stačí pH 7,5. Potřeba nižší hodnoty pH odpovídá požadavku využití technologie desorpce při odstraňování amoniaku z fugátu v technologické praxi.

2.3.1 Desorpce amoniaku

Při desorpci amoniaku dochází ke kontaktu kapalně a plynné fáze. Dochází ke spojení obou fází z důvodu přenosu amoniaku. Jedna fáze protéká druhou tak, aby právě docházelo k vzájemnému kontaktu a amoniak mohl projít (ať už z plynné do kapalně fáze, nebo naopak) skrz rozhraní mezi oběma fázemi. Toto rozhraní představuje největší odpor pro přenos hmoty.

Odpor plynné fáze je důsledkem rozpustnosti a ionizaci amoniaku. Volný amoniak má sklon unikát z kapalně fáze a přibližovat se rovnováze se vzduchem [21].

2.3.2 Kinetika desorpce amoniaku

Pro výpočet rychlosti odstraňování amoniaku z vodného prostředí pomocí stripingu (výměna hmoty kapalina-plyn), uvažujme bublinu stoupající skrz kapalinu a její hmotnostní bilanci. Za dobu, po kterou bublina stoupá, lze předpokládat konstantní koncentraci amoniaku ve vodě a je rovnoměrná v celém reaktoru. Změna hmotnosti čpavku v bublině je vyjádřena [25]:

$$\frac{dm_{\text{NH}_3}}{d\tau} = Fk(c_{\text{NH}_3g}^* - c_{\text{NH}_3g}) = Bk(c_N K_r P - c_{\text{NH}_3g}) \quad (2.63)$$

Kde	m_{NH_3}	hmotnost amoniaku v bublině (g)
	B	povrch bubliny (m^2)
	k	koeficient přestupu hmoty (na základě plynné fáze) ($mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)
	c_{NH_3g}	koncentrace amoniaku v bublině v čase τ ($mol \cdot dm^{-3}$)
	$c_{gnh_3}^*$	rovnovážná koncentrace amoniaku v dotykové bublině ($mol \cdot dm^{-3}$)
	c_N	koncentrace amoniakálního dusíku ($mol \cdot dm^{-3}$)
	F	podíl amoniaku přítomného v roztoku jako NH_3 (–)
	K_r	rovnovážná konstanta ($c_{gnh_3}^* / c_{NP}$) (–)

Pro bublinu s průměrem d [25]:

$$dm_{NH_3} = dc_N^* \frac{\pi d^3}{6}; B = \pi d^2 \quad (2.64)$$

Doplněním do rovnice (2.63):

$$\frac{dc_g}{c_{KP} - c_g} = -\frac{6k}{d} d\tau \quad (2.65)$$

Integrací od času 0 po čas τ :

$$c'_{NH_3g} = c_N K F \left[1 - \exp\left(-\frac{6k}{d} \tau_b\right) \right] \quad (2.66)$$

Kde	c'_{NH_3}	koncentrace amoniaku v bublině po opuštění vsádky ($mol \cdot dm^{-3}$)
	τ_b	doba setrvání bubliny ve vsádce (s)

Změna koncentrace amoniaku ve vodě je vyjádřena [25]:

$$-V \frac{dc}{dt} = c'_g Q \quad (2.67)$$

kde	V	objem vsádky (m^3)
	Q	průtok vzduchu ($m^3 \cdot s^{-1}$)

Do hmotností bilance je nutno započítat i desorpci amoniaku přímo z volné hladiny, tj. z hladiny která je přímo v kontaktu s plynou fází nad ní [25]:

$$-V \frac{dc_N}{dt} = A_h k' (c_{NH_3g}^* - c''_{NH_3g}) = c_N K F s (1 - f) \quad (2.68)$$

$$f = c''_{NH_3g} / c_{NH_3g}^* \quad (2.69)$$

kde	c_{NH_3g}''	koncentrace amoniaku vstupující do plynné fáze nad hladinou ($mol \cdot dm^{-3}$)
	k'	koeficient přestupu hmoty z volné hladiny ($mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)
	A_h	povrch volné hladiny (m^2)
	s	součin povrchu volné hladiny a koeficientu přestupu hmoty z volné hladiny ($mol \cdot m \cdot s^{-1}$)
	f	stupeň nasycení vzduchu vstupujícího do prostoru nad vodou povrchu s ohledem na objemovou koncentraci kapalného amoniaku (–)

Kombinací rovnic (2.66), (2.67), (2.68) dostáváme celkový výraz pro přestup hmoty amoniaku v důsledku desorpce z volné hladiny a z kontaktu kapaliny s povrchem bubliny [25]:

$$-V \frac{dc_N}{dt} c_N KF(1 - e^{-k\tau}) \cdot Q + CKFs(1 - f) \quad (2.70)$$

Integrací pro výpočet rychlosti desorpce amoniaku z kapaliny [25]:

$$\ln \frac{c_o}{c_N} = \frac{Qt}{V} KF \left[(1 - e^{-k\tau}) + \frac{s}{Q(1 - f)} \right] \quad (2.71)$$

kde c_o počáteční koncentrace amoniaku v kapalině ($\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$)

Z rovnice (2.66) dostáváme pro bublinu dostávající se k hladině ($c_g' = c_g''$) [25]:

$$f = 1 - e^{-\alpha\tau V} \quad (2.72)$$

Dosazením do rovnice (2.71):

$$\ln \frac{c_o}{c_N} = \frac{Qt}{V} = KF \left[1 - \left(1 - \frac{s}{Q} \right) e^{-\alpha\tau} \right] \quad (2.73)$$

2.3.3 Důsledky kinetiky desorpce amoniaku

Z rovnic v předchozí části vyplývá několik důsledků, respektive parametrů, které přímo ovlivňují rychlost desorpce. Patří mezi ně zejména teplota, rychlost proudění probublávajícího vzduchu, a pH kapaliny.

2.3.3.1 Vliv teploty a pH

Zvýšení teploty vede ke zvýšení Henryho konstanty, což znamená že v roztoku se amoniak nebude tolik rozpouštět a bude se spíše vyskytovat ve své nevázané formě [17]. Dalším projevem zvýšení teploty je posun k zastoupení nevázané formy amoniaku při stejném pH [21]. Zvýšením pH se taktéž zvyšuje poměr nevázané formy amoniaku vůči vázané [17, 21]. Kladný vliv zvýšení teploty se ve větším projevu až při ohřevu v o desítky stupňů. Ohřev v rámci jednotek stupňů nemá příliš smysl [26].

2.3.3.2 Vliv probublávajícího plynu

Průtok plynu, kterým je reaktor s roztokem probubláván, ovlivňuje desorpci v několika ohledech. Zvýšením průtoku se urychluje desorpce amoniaku [27]. Zvyšuje se efekt kontaktu mezi plynem a kapalinou [17]. Zvýšení průtoku má za následek zvýšení efektivity, tzn. za stejný čas se při větším průtoku odstraní více amoniaku [26]. Pozitivní efekt na desorpci má i zvýšení rychlosti proudění vzduchu nad kapalinou, a to hlavně z důvodu, že se nestíhá vytvořit rovnováha mezi vzdušnou a kapalnou fází. Větší vliv na rychlost desorpce má probublávání kapaliny než odvětrávání prostoru nad kapalinou [17]. Největší desorpce se dosáhne spojením obou způsobů.

Vliv průměru bubliny a kontaktního času (času, který bublina stráví v kontaktu s kapalinou) byl zkoumán, avšak výsledky se v rámci studií rozcházejí [25].

2.4 Absorpce

Absorpce je operace, při které je směs plynů uvedena do kontaktu s vhodnou kapalinou za účelem přednostního rozpuštění jedné nebo více složek plynu v kapalině. Tyto plynné složky jsou odstraněny z plynné fáze. Rozpuštěné složky mohou buď tvořit fyzikální roztok s kapalinou, nebo s kapalinou chemicky reagovat. Proto rozdělujeme absorpci na absorpci bez chemické reakce a s chemickou reakcí. Plyny přecházející do kapaliny nazýváme rozpouštěnou látkou (absorbát), kapalinu jako rozpouštědlo (absorbent) [1, 5, 10, 12, 13, 14].

Absorpce je v praxi velmi používaný proces. Obecně v zato se využívá při [13]:

1. Čištění plynů – odstraňování znečišťujících látek z proudu plynu
2. Výroba roztoků – absorpce chlorovodíku do vody za vzniku kyseliny chlorovodíkové
3. Obnova produktu – absorpce zkapalněných ropných plynů ze zemního plynu
4. Sušení – absorpce vodní páry ze směsi zemního plynu.

2.4.1 Absorpce bez chemické reakce

Látková bilance absorpce bez chemické reakce je stejná jak při fyzikální desorpci bez chemické reakce, tudíž:

$$(akumulace) = (difuze dovnitř) - (difuze ven)$$

Popis absorpce bez chemické reakce je založen na filmové teorii difuze, probírané v kapitole 2.2.1.2.

2.4.2 Absorpce s chemickou reakcí

Dochází-li při absorpci k chemické reakci absorbentu a absorbované látky, je tento stav převážně žádaný, protože z podstaty věci zlepšuje celkovou absorpci. Látkovou bilanci je nutno upravit na tvar [11, 14, 16]:

$$(akumulace) + (reakce) = (difuze dovnitř) - (difuze ven)$$

Původní bilanční rovnici musí být rozšířena o člen vyjadřující vliv rychlosti chemické reakce difundující složky ve vzdálenosti Δz . Tento člen je roven $v_1 \Delta z$. Výsledná bilance je pak rovna [16]:

$$-D \frac{\partial c_1}{\partial z} + D \left(\frac{\partial^2 c_1}{\partial z^2} + \Delta z \frac{\partial^2 c_1}{\partial z^2} \right) = \Delta z \frac{\partial c_1}{\partial \tau} + v_1 \Delta z \quad (2.74)$$

Úpravou, kdy rychlost chemické reakce bude se záporným znaménkem z důvodu difuze k mezifázovému rozhraní, vzniká modifikovaný 2. Fickův zákon [16]:

$$\frac{\partial c_1}{\partial \tau} = D \frac{\partial^2 c_1}{\partial z^2} - v_1 \quad (2.75)$$

2.4.2.1 Rychlost chemické reakce

Obecná rovnice chemické reakce je vyjádřena zápisem [14, 16]:



kde a, b, c, d stechiometrické koeficienty (–)

k_r rychlostní konstanta reakce ($s^{-1} \cdot (\text{mol} \cdot \text{m}^{-3})^{1-n_r}$)

Rychlost chemické reakce je následně vyjádřena jako:

$$v_1 = k \cdot c_A^\alpha \cdot c_B^\beta \quad (2.77)$$

Kde α, β dílčí řády reakce vztažené ke složce A, respektive B (–)

Dílčí řády chemické reakce nejsou, až na výjimku u elementárních reakcí, rovny stechiometrickým koeficientům. Celkový řád reakce se vypočítá jako součet dílčích řádů [14, 16]:

Celkový řád reakce Γ (–) se vypočítá jako součet dílčích řádů:

$$\Gamma = \alpha + \beta \quad (2.78)$$

Na základě celkové řádu dělíme reakce [14, 16]:

- Reakce nultého řádu
- Reakce prvního řádu
- Reakce druhého řádu
- Reakce třetího řádu
- Reakce následných řádů.

2.4.2.2 Vliv rychlosti chemické reakce

Absorpci s chemickou reakcí lze rozdělit podle rychlosti na [28]:

- velmi pomalé reakce
- pomalé reakce
- rychlé reakce.

K zařazení k jednotlivým typům slouží Hattovo kritérium Ha . Kritérium udává poměr rychlosti chemické reakce a rychlosti absorpce, kdyby běžela bez chemické reakce [16, 28]:

$$Ha = \sqrt{\frac{D_{Al} \cdot v_1}{C_A \cdot (k_{lc}^0)^2}} \quad (2.79)$$

kde D_{Al} difúzní koeficient složky a v kapalně fázi ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
 C_A molární koncentrace absorbované složky ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$)
 k_{lc}^0 součinitel přestupu hmoty v kapalně fázi bez chemické reakce ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Pomalé reakce $Ha \leq 10^{-2}$

Při velmi pomalých reakcích dochází k potlačení vlivu chemické reakce, absorpce je tudíž řízena čistě fyzikálními jevy. Absorbovaná složka s rozpouštědlem vůbec nereaguje, nebo jen velmi málo, důsledkem toho je odvod absorbentu ze zařízení bez zreagování. Z toho plyne, že rychlost absorpce bude stejná jako rychlost odváděného rozpouštěného plynu z absorpčního zařízení [16].

Pomalé reakce $10^{-1} \leq Ha \leq 100$

V absorpčním zařízení zreaguje již větší část absorbované složky, avšak v difúzním filmu pouze nepatrné množství, zbytek zreaguje až v prostřed absorbentu. Nezreagovaný absorbát bude difundovat z difúzního filmu do středu proudícího absorbentu stejnou rychlostí jako z povrchu kapaliny do difúzního filmu [16].

Rychlé reakce $100 < Ha$

Reakce je nyní natolik rychlá, že většina rozpouštěné látky zreaguje již v difúzním filmu. Jen část absorbátu zreaguje až v jádru absorbentu. Plocha mezifázového rozhraní je faktorem určující rychlost absorpce. Rychlá reakce je nejefektivnější typ absorpce [16].

2.5 Analytické metody stanovení amoniakálního dusíku ve vodném prostředí

2.5.1 Stanovení amoniakálního dusíku spektrofotometricky

Analytické stanovení amoniaku pomocí spektrofotometrie je založena na reakci amonných iontů s vybarvovacím roztokem. Následuje vybarvení vzorku a jeho poměření ve spektrofotometru. Tyto metody jsou velmi vhodné díky možnosti jejich kalibrace. Existuje více

druhů vybarvovacích roztoků, avšak v této diplomové práci a její experimentální části se pracovalo s roztoky dichlorisokyanuratanu sodného v kombinaci s nitroprussidem sodným a salicylanem sodným, a tak bude více rozepsána právě tato metoda [22]. Mezi další možnost patří původní indofenolová metoda, která využívá modré zbarvení indofenolu vznikající reakcí $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ s fenolem a chlornanem sodným [29]. K další velmi využívané vybarvovací reakci dochází při reakci Nesslerova činidla $\text{K}_2[\text{HgI}_4]$ v KOH [30].

2.5.1.1 Modifikovaná indofenolová metoda pro stanovení amonných iontů ve vodném prostředí

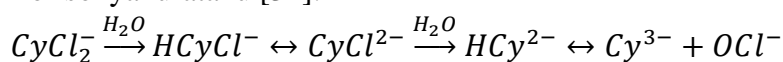
Zvolený způsob stanovení amoniaku slouží k určení kvantity amoniaku, respektive amoniakálního dusíku, viz kapitola 2.3, na základě chemické reakce amonných iontů s vybarvovacím činidlem. Barva výsledného roztoku se na základě koncentrace amonných iontů pohybuje v zelenomodrých odstínech. Vzorky mohou pocházet z pitné vody a většiny odpadních vod. Avšak pokud je vzorek příliš kontaminován, například je silně zbarvený, je nutné vzorek predestilovat [22].

Samotné vybarvení je založeno na reakci amoniaku, chlornanu a salicylanu. Vzniká sloučenina indofenolového typu. Reakce je katalyzována nitroprussidem sodným. Vznik chlornanových iontů je iniciován alkalickou hydrolyzou dichlorisokyanuratanu sodného. Ačkoliv samotný indofenol je modře zbarvený, výsledná barva se blíží k zelené, a to díky žluté barvě nitroprussidu [31].

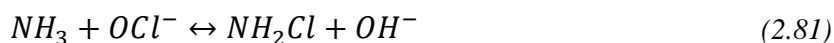
Rozsah měření se uvádí do koncentrace $1 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ amoniakálního dusíku. Koncentrovanější vzorky se musí naředit. Mez detekce je mezi $0,003$ a $0,008 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ [22].

Reakce běží podle následujícího schématu. Nejlepších výsledků se dosáhne při pH 12,6 [22].

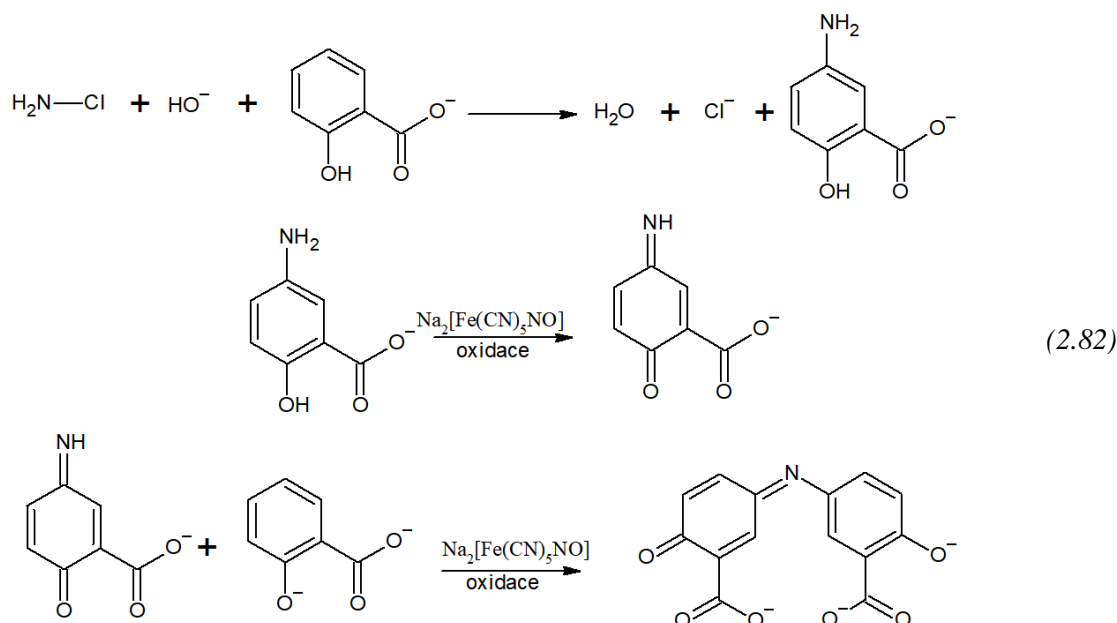
Hydrolyza dichlorisokyanuratanu [32]:



Po hydrolyze dichlorisokyanuratanu následuje reakce chlornanu s amoniakem, který při tomto pH je ve formě NH_3 [31, 32, 33]:



Následuje vznik sloučeniny indofenolového typu [33]:



Rušivé vlivy kationtů, převážně hořčíku a vápníku, jsou maskovány přidavkem citronanu sodného. V úvahu se musí brát i obsah anilinu a aminoethanolu ve vzorku. Obě látky silně ruší přesnost měření. Obdobný problém lze předpokládat u většiny primárních aminů [22, 32]. Mezi úskalí metody patří zejména udržení silně alkalického prostředí [22].

Měření vzorku probíhá po určitém čase, během kterého dochází k vybarvení. Tento čas by měl být pro všechny vzorky stejný (stejně jako teplota při měření). Vlnová délka měření odpovídá maximální absorpenci kolem vlnové délky 655 nm [22, 32]. Měření probíhá proti slepému vzorku [22]. Výsledná absorbance se vypočítá:

$$A_r = A_s - A_b \quad (2.83)$$

kde A_r výsledná absorbance (–)
 A_s absorbance měřeného vzorku (–)
 A_b absorbance slepého vzorku (–)

2.5.2 Odměrné neutralizační stanovení amoniakálního dusíku

Principem této metody je převedení veškerého amoniakálního dusíku do podoby NH_3 alkalizací roztoku. Následuje jeho predestilování a jímání do kyseliny borité. Vzniklý dihydrogenboritan sodný je titrován roztokem kyseliny chlorovodíkové na Taschirův směsný indikátor. Tato metoda se hodí pro koncentrace amoniakálního dusíku větší než $1 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ a menším než $25 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$, nebo pro velmi znečištěné a zbarvené vzorky [31].

Mezi interference patří zejména chlor, který může pocházet z úprav původní vody. Dále je to močovina, která destilací přechází do kyseliny borité ve formě amoniaku, jednalo by se tudíž již o organicky vázaný dusík. Dále rušivé vlivy mohou způsobovat aminy, chloraminy či hydrazin. [31].

2.5.3 Iontově selektivní elektroda pro stanovení amoniaku

Tato potenciometrická metoda využívající přestup plynného amoniaku skrz iontově selektivní membránu. Pro měření je potřeba znát pH a teplotu roztoku, neboť zastoupení plynného amoniaku NH_3 je na nich závislé [21].

Volný amoniak prochází skrz hydrofobní membránu elektrody, dochází ke změně pH ve vnitřním roztoku elektrody. Pevná hladina chloridů ve vnitřním roztoku je snímána chloridovou iontově selektivní elektrodou, která slouží jako referenční elektroda. Změna pH je relativní k množství přítomného amoniaku. Odezva je v mV [34].

Metoda je vhodná pro koncentrace amoniakálního dusíku od 0,03 po 1 400 mg · dm⁻³. Barva či zákal nemají vliv na výsledky, není proto nutné znečištěné vzorky predestilovat jako u spektrofotometrických analýz. Mezi organické rušivé sloučeniny patří aminy. Mezi anorganické rtuť nebo stříbro, které s amoniakem tvoří komplexy. Tvorbě komplexů se lze vyvarovat přidávkem EDTA [34].

2.5.4 Fluorescenční stanovení amoniakálního dusíku

Velmi citlivá metoda vhodná spíše pro stopové množství amoniakálního dusíku využívá měření fluorescence sloučeniny vzniklé reakcí amoniaku s činidlem. Analýza může být spojena s iontovou chromatografií, která pomáhá vyřešit interference a rozšiřuje detekční rozsah [35, 36].

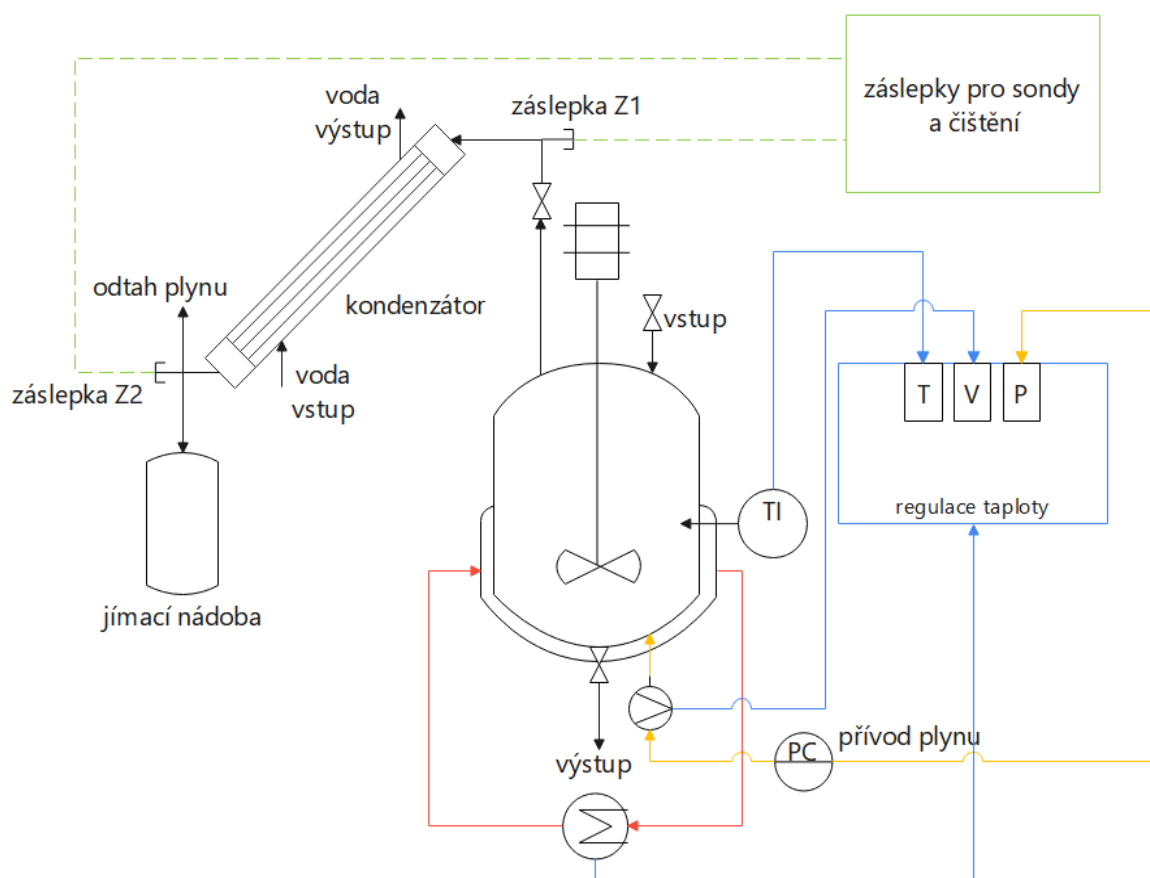
Jednou z možností může být reakce ftalaldehydu, amoniaku a sulfitu, merkaptoethanolu nebo n-acetylcysteinu. Vznikají velmi fluorescenční sloučeniny na bázi isoindolů [36]. Pro lepší průběh reakce může být využito temperování aparatury až k 85 °C [35].

Novější reakční schémata pracují například s benzylchloridem (BnCl). Pokud bude BnCl s amoniakálním dusíkem a hydrogenuhlíčanem sodným reagovat v zásaditém prostředí vytvoří se silně fluoreskující sloučenina. V alkalických podmínkách je vazba C-Cl v BnCl velmi slabá a ze sloučeniny vypadává Cl⁻, zároveň je veškerý amoniakální dusík ve formě NH₃. Dochází k vzájemné reakci a vzniká benzylamin. K lepším výsledkům dochází při navýšení teploty během reakce na 35 °C. Mezi rušivé jevy patří ionty mědi, železa či aceton [36]. Druhou možností je reakce amoniaku s 4-methoxyphthalaldehydem [36].

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 Stripovací zařízení

Experimentální měření probíhalo na nekontinuálním stripovacím zařízením sestaveným MVB Opava ve spolupráci s FCH VUT pro laboratoř chemického inženýrství. Konstrukce zařízení kladla důraz na možnost rychlého ověření teorie v praxi, snadnou modulovatelnost, obsluhovatelnost a údržbu. Na základě těchto předpokladů byl sestaven striper sestávající se z ovládacího zařízení pro regulaci teploty reaktoru a průtoku stripovacího plynu, reaktoru napojeného na tepelný okruh, míchadla, přívodu stripovacího plynu, kondenzátoru a jímací nádoby. Sestava byla doplněna o kompresor pro snadnější čištění zařízení a o odtah unikajících plynů. Striper byl připojen k fakultnímu rozvodu stlačeného vzduchu, kondenzátor k vodovodnímu řádu. Celé zařízení je elektricky napájeno 220V.



Obr. 13 Schéma striperu.

3.2 Funkce experimentálního striperu

Před spuštěním samotného stripování je nutno učinit několik kroků. Reaktor musí být před spuštěním procesu napuštěn stripovanou kapalinou. Provádí se tak přes plnicí kohout ve víku reaktoru. Po naplnění reaktoru určitou dávkou je ventil uzavřen a je zapnuto míchadlo. V dalším kroku je spuštěn tepelný okruh a objem reaktoru je temperován na zvolenou teplotu. Po vyhřátí kapaliny je spuštěn okruh chlazení kondenzátoru, otevřen ventil na odvodu par z reaktoru. Následuje otevření ventilu stripovacího plynu a navolení průtoku stripovacího plynu pomocí redukčního ventilu. Stripovací plyn je vháněn do spodní části reaktoru, prostupuje kapalinou

ve formě dispergovaných bublin. Dochází ke kontaktu kapalina-plyn a k desorpci plynu rozpuštěného v měřené kapalině, díky zvýšené teplotě dochází i k většímu vypařování. Takto oddělené plyny spolu se stripovacím plynem stoupají reaktorem směrem vzhůru a jsou odváděny do kondenzátoru. V něm kondenzuje krom stripovaných plynů i vodní pára. Kondenzát (respektive destilát) je jímán do předem připravené nádoby. Nezkondenzované páry a nezachycené plyny jsou odváděny vzduchotechnikou mimo pracovní místnost. Po dokončení měřicího cyklu je vypnuto probublávání reaktoru, vypnut ohřev, zastaveno promíchávání a jsou zavřeny ventily přívodu stripovacího plynu a odvodu par z reaktoru. Nad kondenzátorem je připojen kompresor za účelem vytlačení veškerých vzniklých plynů a zkondenzované kapaliny ze striperu. Po vytlačení je kompresor odpojen. Z reaktoru je vypouštěcím kohoutem ve spodní části vypuštěn veškerý zbylý obsah vsádky. Reaktor může být posléze vymyt proudem vody přes vstupní kohout.

Během cyklu měření je možno odebírat vzorky z reaktoru i z destilátu v jímací nádobě. Z reaktoru pouhým otevřením vypouštěcího kohoutu. Pro odběr vzorku z jímací nádoby je možno proces stripování zastavit zavřením ventilů pro odvod par a přívodu stripovacího plynu. Posléze je možno kondenzátor propláchnout kompresorem. Tímto způsobem se získá veškerý objem v kondenzační části zařízení. Pro odběr vzorku ke stanovení průběžné koncentrace není nutné proces stripování zastavovat.

Pro měření obsahu par, rychlosti proudění v kondenzační části zařízení a pro měření obsahu nezkondenzovaných plynů je aparatura vybavena několika odběrovými místy. První místo se nachází nad ventilem pro odvod plynů. Jedná se o záslepku Z1 s možností vložení a zaizolování měřící sondy. Druhá možnost je záslepka Z2 nad kondenzační nádobou. Opět je odběrové místo vybaveno záslepkou s možností zaizolování sondy či anemometru.



Obr. 14 Foto striperu v prostředí laboratoře chemického inženýrství.

3.3 Postupy měření

3.3.1 Použité chemikálie

3.3.1.1 Chlorid amonný

Chlorid amonný (NH_4Cl), je bílá krystalická látka. Jedná se o slabě kyselou sloučeninu dobře rozpustnou ve vodě. Je bez zápachu, mírně slaný [38]. Pro měření byl dodán v p.a. kvalitě.

Chlorid amonný byl využit pro přípravu roztoků o přesné koncentraci amoniaku. Ve vodě se endotermicky rozpouští za uvolnění amoniaku [38].

Tabulka 2 Čistota chloridu amonného [39].

Ztráta sušením	max. 0,5 %
Sírany	max. 0,005 %
Železo	max. 0,005 %
Těžké kovy	max. 0,005 %

3.3.1.2 Amoniak, vodný roztok

Čirá, bezbarvá kapalina se silně specifickým zápachem [40]. Jedná se o roztok amoniaku ve vodě s minimální koncentrací 24 %. Roztok byl využit k přípravě roztoků pro měření, avšak kvůli diskutabilní kvalitě (na základě velké těkavosti samotného amoniaku) bylo nutné stanovovat přesnou koncentraci roztoku před každým měřením.

Tabulka 3 Čistota roztoku amoniaku [41].

Netěkavé látky	max. 0,001 %
Chloridy	max. 0,000 1 %
Celková síra	max. 0,000 3 %
Uhličitany	max. 0,002 %
Vápník	max. 0,000 1 %
Železo	max. 0,000 1 %
Těžké kovy	max. 0,000 1 %

3.3.1.3 Hydroxid sodný

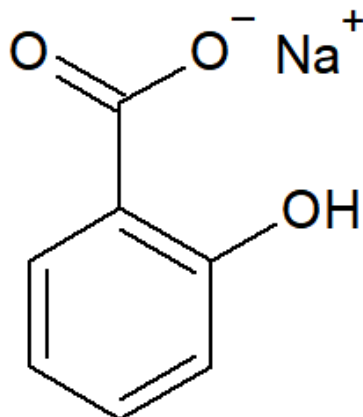
Hydroxid sodný je v pevném stavu bílá látka ve formě perliček, granulí či šupinek, je bez zápachu. Je silně zásaditý a hygroskopický. Ze vzduchu je schopen absorbovat oxid uhličitý za vzniku uhličitanu sodného. Dodává se buď v pevné formě nebo v až v 50% bezbarvém roztoku. Doporučuje se skladovat v plastových obalech. Při rozpuštění uvolňuje velké množství tepla [42]. Pro experimenty byl využit perličkový NaOH.

Tabulka 4 Čistota hydroxidu sodného [43].

Uhličitan sodný	max. 1,5 %
Chloridy	max. 0,007 %
Sírany	max. 0,003 %
Oxid křemičitý	max. 0,005 %
Dusík celkový	max. 0,000 5 %
Železo	max. 0,001 %
Těžké kovy	max. 0,001 %

3.3.1.4 Salicylan sodný

Sodná sůl kyseliny salicylové je jemný bílý prášek dobře rozpustný ve vodě [44].



Obr. 15 Schéma salicylanu sodného.

Pro měření byl vybrán v čistotě minimálně 99,5%.

Tabulka 5 Čistota salicylanu sodného [45].

Chloridy	max. 0,01 %
Sírany	max. 0,06 %
Amonné ionty	max. 0,000 2 %

3.3.1.5 Nitroprussid sodný

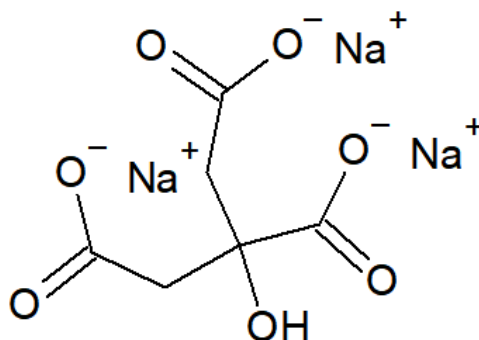
Nitroprussid sodný $\text{Na}_2[\text{Fe}(\text{CN})_5\text{NO}] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, je anorganická, ve vodě rozpustná, krystalická látka červenohnědé barvy. Látka se na světle rozkládá, a proto je nutné ji uchovávat ve tmě. Nitroprussid se může rozkládat až na CN radikály, CN^- , nebo NO^+ [46]. Dodává se jako dihydrát v čistotě větší než 99,5 %.

3.3.1.6 Dihydrát citronanu trisodného

Jedná se o bílou, velmi jemnou krystalickou látku. Citronan je dobře rozpustný ve vodě. Pro měření byl využit v čistotě p.a.

Tabulka 6 Čistota citronanu trisodného [47].

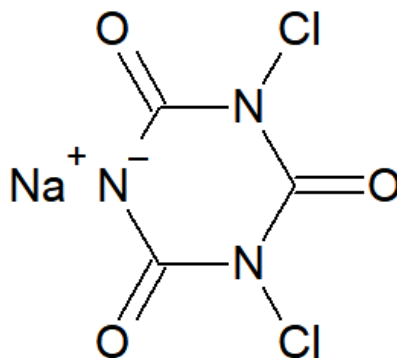
Chloridy	max. 0,01 %
Sírany	max. 0,06 %
Oxaláty	max. 0,03 %
Těžké kovy	max. 0,001 %



Obr. 16 Schéma citronanu trisodného.

3.3.1.7 Dichlorisokyanuratan sodný

Ve vodě rozpustná, heterocyklická sloučenina bílé barvy dodávaná ve formě prášku. Při jeho rozpadu vniká plynný chlor, proto se musí skladovat v dobře izolované nádobě, nejlépe mimo dosah světelných a tepelných zdrojů [48]. K dostání je ve formě dihydrátu s čistotou minimálně 98 %.



Obr. 17 Dichlorisokyanuratan sodný.

3.3.1.8 Síran draselný

Síran draselný je bílá krystalická látka, dobře rozpustná ve vodě [49]. V experimentální části byl použit pro úpravu pH amonných roztoků. Byl využit v kvalitě p.a.

Tabulka 7 Čistota síranu draselného [50].

Chloridy	max. 0,000 5 %
Těžké kovy	max. 0,001 %

3.3.1.9 Kyselina dusičná

Kyselina dusičná je dýmavá kyselina, která vytváří červenohnědé výpary a má dusivý zápach [51]. V práci byla využita v kvalitě p.a. pro přípravu absorpčního média.

Tabulka 8 Čistota kyseliny dusičné [52].

Chloridy	max. 0,000 5 %
Sírany	max. 0,000 2 %
Železo	max. 0,000 1 %
Těžké kovy	max. 0,000 1 %

3.3.1.10 Hydrogensíran draselný

Bezbarvá krystalická látka [53]. KHSO_4 byl použit pro přípravu absorpčního média.

Tabulka 9 Čistota hydrogensíranu draselného [54].

Chloridy	max. 0,000 5 %
Sírany	max. 0,000 2 %
Železo	max. 0,000 1 %
Těžké kovy	max. 0,000 1 %

3.3.1.11 Voda

Pro analýzu a přípravu vzorků byla použita demineralizovaná voda z fakultního zařízení. Pro mytí zařízení byla použita voda z vodovodního řádu.

3.3.2 Použité vybavení

Mimo experimentální striper a běžné laboratorní sklo bylo využito i jiné laboratorní techniky. Ta je popsána v této kapitole.

3.3.2.1 Spektrofotometr Hah DR 5000

Hah DR 5000 je spektrofotometr měřící v rozsahu UV-VIS 190 až 1100 nm. Je vybaven vnitřním uložištěm a USB portem pro export dat.

Tabulka 10 Technické parametry spektrofotometru Hah DR 5000 [55].

Přesnost vlnové délky	$\pm 1 \text{ nm}$ v 200 až 900 nm
Reprodukovatelnost vlnové délky	0,1 nm
Rozlišení vlnové délky	0,1 nm
Rychlost skenování	$900 \text{ nm} \cdot \text{min}^{-1}$



Obr. 18 Spektrofotometr Hah DR 5000 v laboratoři chemického inženýrství.

3.3.3 Kalibrace

Stanovení amonných iontů modifikovanou indofenolovou spektrofotometrickou metodou dovolilo provedení kalibrace i jednotlivých měření. Měření nejen kalibrační křivky bylo v laboratoři provedeno pomocí ČSN ISO 7150-1.

3.3.3.1 Příprava roztoků

Byly připraveny dva vybarvovací roztoky. Roztok *A* (vybarvovací činidlo) se připravil rozpuštěním $65,0 \pm 0,5$ g salicylanu sodného, $65,0 \pm 0,5$ g dihydrátu citronanu trisodného a $0,425 \pm 0,002$ g nitroprussidu sodného v demineralizované vodě. Roztok byl doplněn v odměrné baňce 500 cm^3 po rysku. Pro svoji povahu byl roztok uchováván na tmném místě v alobalem obalené baňce. Roztok *B* (činidlo) byl připraven rozpuštěním $16,0 \pm 0,5$ g hydroxidu sodného s $1,00 \pm 0,01$ g dichlorisokyanuratanu sodného v demineralizované vodě. V 500 cm^3 odměrné baňce byl roztok doplněn po rysku. Pro svoji povahu byl roztok uchováván na tmném místě v alobalem obalené baňce.

Roztok *C* pro vzorky s přesnou koncentrací amoniakálního dusíku byl připraven rozpuštěním $3,819 \pm 0,004$ g chloridu amonného v deionizované vodě a v 1000 cm^3 odměrné baňce doplněn po rysku. Objem 1 cm^3 roztoku odpovídá 1 mg amoniakálního dusíku. Dvě stě násobným zředěním byl připraven roztok *D* na jehož 1 cm^3 připadalo 5 μg amoniakálního dusíku. Pro kalibraci byly připraveny vzorky zředěním roztoku *D* na odpovídající koncentrace.

Ředění probíhalo do odměrných baněk s objemem 50 cm^3 . K roztoku *D* byly přidány $4,00 \pm 0,05 \text{ cm}^3$ roztoku *A* a *B*. Baňka byla po rysku doplněna demineralizovanou vodou. Tím byl roztok *D* zředěn 50x. Celkové zředění roztoku *C* bylo 10 000.

3.3.3.2 Měření absorpčního spektra

Získání vlnové délky s maximální absorbancí je klíčovým parametrem. Norma uvádí, že hledaná délka je při 655 nm [22].

K dosažení požadované délky byl připraven roztok amoniakálního dusíku o náhodné koncentraci splňující rozsah normy. K roztoku byly přidány činidla a objem byl doplněn po rysku v 50 cm^3 odměrné baňce. Měření spektra proběhlo po 60 minutách.

3.3.3.3 Měření kinetiky vybarvovací reakce

Norma ČSN ISO 7540-1 tento krok vynechává [22], avšak k porozumění průběhu vybarvovací reakce je to velmi potřebné měření. Kinetika reakce udává změnu absorbance vlnové délky se změnou času neboli jak se v čase mění zbarvení roztoku, ten totiž postupem času tmavne. Měření bylo potřebné k určení časového rozmezí, po které je možné roztoky analyzovat aniž by docházelo ke změnám. Znalost kinetiky může být využita například při přípravě kalibrační křivky, kdy se mohou všechny roztoky namíchat v jednom kroku a vyhodnocovat později.

Posouzení kinetiky probíhalo při vzorku o náhodné koncentraci amoniakálního dusíku splňující rozsah normy. K roztoku byla přidána činidla a objem byl doplněn po rysku v 50 cm^3 odměrné baňce. Byly zapnuty stopky. Roztok byl v odpovídající kyvetě umístěn do spektrofotometru a měřen při vlnové délce určené z měření absorbance.

3.3.3.4 Kalibrační křivka

Podle plánovaného rozsahu měření experimentální části byl zvolen interval koncentrace amoniakálního dusíku od $0,5$ po $8 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3}$, v koncentrační řadě po $1,5 \text{ g}$.

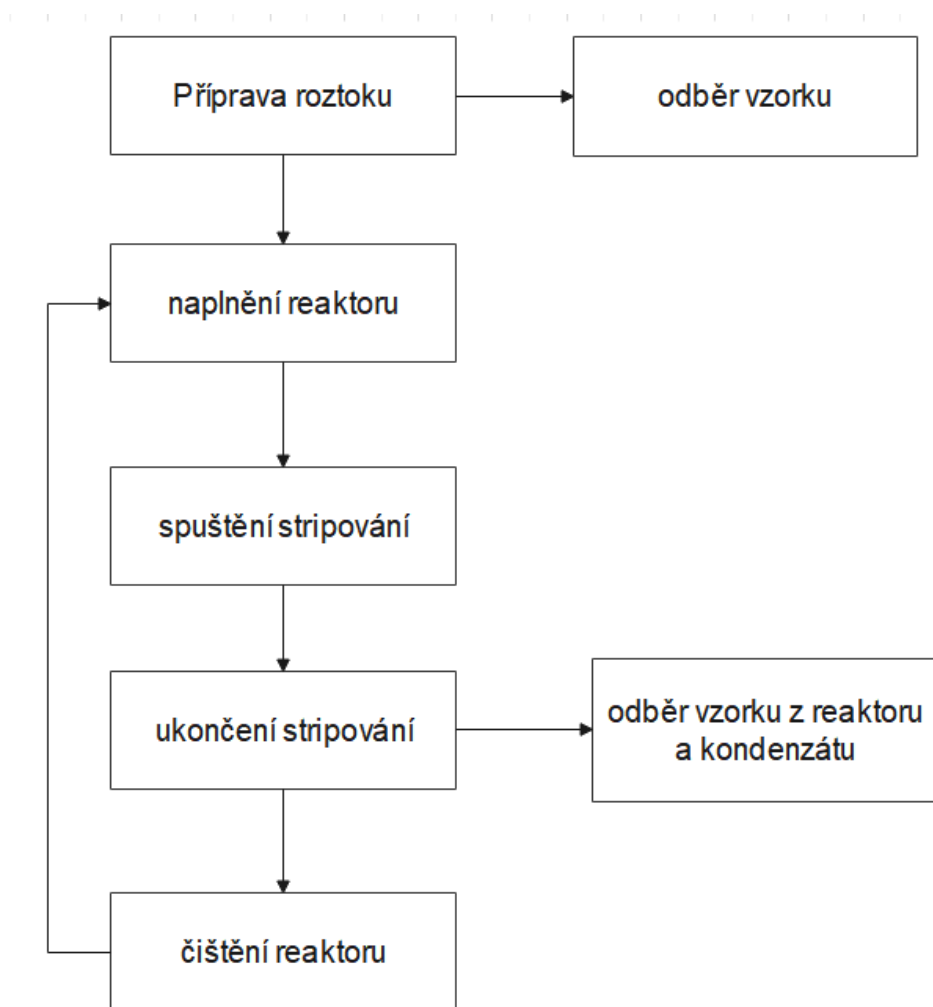
3.3.4 Postup měření na experimentálním zařízení striperu

Měření na zařízení striperu se zabývá ověřením teorie desorpce amoniaku z kapaliny a klade si za úkol poměřit účinnosti separace amoniaku z reaktoru. Experimenty jsou rozděleny do dvou částí. V první části práce se pracuje s laboratorními roztoky amoniaku a druhá část pracuje již s fugátem z bioplynových stanic, která je bohatá na amoniak.

3.3.4.1 Měření s laboratorními roztoky

Fáze s laboratorními roztoky byla koncipována k prověření intervalu funkčnosti experimentálního zařízení. Byly zjišťovány podmínky, za jakých je desorpce amoniaku nejúčinnější, jaké jsou nedostatky experimentálního zařízení a jak tyto nedostatky efektivně odstranit. Pro potvrzení funkčnosti zařízení bylo měření rozvrženo o koncentraci amoniakálního dusíku kolem $3 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3}$ s krokem s variací teplot od 40 do 70 °C. Délky pokusů se na základě zkoumané charakteristiky různily.

Měření mělo následující postup. Byl připraven roztok o objemu $1,5 \text{ dm}^3$. Smícháním 48 cm^{-3} roztoku čpavkové vody s 1452 cm^{-3} destilované vody. Po homogenizaci roztoku byl odebrán vzorek pro přesnou analýzu obsahu amoniakálního dusíku. Roztok byl nalit do reaktoru experimentálního striperu. Byl zapnut okruh tepelného čerpadla, puštěno míchadlo a reaktor byl temperován na zvolenou teplotu. Po dosažení optimální teploty byl otevřen ventil před kondenzátorem a do reaktoru byl přiveden stripovací plyn rychlostí $25 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$. Po uplynutí času experimentu byl zastaven přívod vzduchu a uzavřen ventil pod kondenzátorem. Míchadlo spolu s termostatem bylo vypnuto. Odebral se vzorek z reaktoru a zbytek obsahu reaktoru byl vypuštěn. Do záslepky Z1 byla vsunuta hadice z kompresoru. Pomocí stlačeného vzduchu byl vypláchnut obsah kondenzátoru do jímací nádoby. Kompresor byl odpojen. Z jímací nádoby bylo odečteno množství kondenzátu a odebrán vzorek pro analýzu. Jímací nádoba byla vyčištěna a vrácena zpět. Reaktor byl vymyt proudem vody z vodovodního řádu.



Obr. 19 Zjednodušené schéma postupu měření na experimentálním stripovacím zařízení.

3.3.4.2 Měření s reálnými roztoky

Roztoky amoniaku byly v tomto kroku nahrazeny fugátem. Postup měření byl obdobný, avšak spektrofotometrická analýza obsahu amoniakálního dusíku mohla být provedena díky povaze fugátu pouze z destilátu. Obsah amoniakálního dusíku v původním fugátu byla dříve stanoven laboratorně s elektroforézou.

Po měření s fugátem byl reaktor vyplachován intenzivněji, aby došlo k odstranění zbytků fugátu ze stěn reaktoru.

3.3.5 Rozložení měření

K ověření funkčnosti experimentálního striperu byla praktická část diplomové práce rozdělena do několika bodů:

- Ověření funkčnosti zařízení s laboratorními vzorky
- Měření s laboratorními vzorky
- Měření průtoků par a složení par za kondenzátorem
- Měření s fugátem
- Měření s absorpcí do kapalin.

3.3.5.1 *Ověření funkčnosti zařízení s laboratorními vzorky*

První spuštění experimentálního zařízení kladlo na důraz zjištění možných nedostatků před ostrým měřením a k potvrzení myšlenky celého experimentu. Pro toto měření byla zvolena teplota 65 °C, koncentrace amoniakálního dusíku $3 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3}$, objem vsádky reaktoru $1,5 \text{ dm}^{-3}$. Doba průběhu experimentu 3 hodiny.

Pozorováno bylo zejména chování tepelného výměníku, míchadla a regulace průtoku stripovacího plynu.

3.3.5.2 *Měření s laboratorními vzorky*

Pro stanovení základní charakteristiky zařízení byla provedena měření při teplotách 50 a 55 °C.

3.3.5.3 *Měření průtoků par a složení par za kondenzátorem*

Na měření s laboratorními vzorky bylo navázáno stanovení kvantity úniku nezkondenzovaného amoniaku a proměření rychlosti proudění par za reaktorem. Pro měření kvantity amoniaku v odtahu striperu byl pozván do laboratoře Ing. Antonín Dolan, Ph.D. z Jihočeské univerzity v Českých Budějovicích s měřícím přístrojem Innova.



Obr. 20 Analyzátor plynu Innova [56].

Do záslepky Z2 byla vložena sonda pro měření složení plynů, sonda byla dobře zaizolována a ukotvena proti pádu. Do záslepky Z1 byl vložen anemometr a důkladně zaizolován.

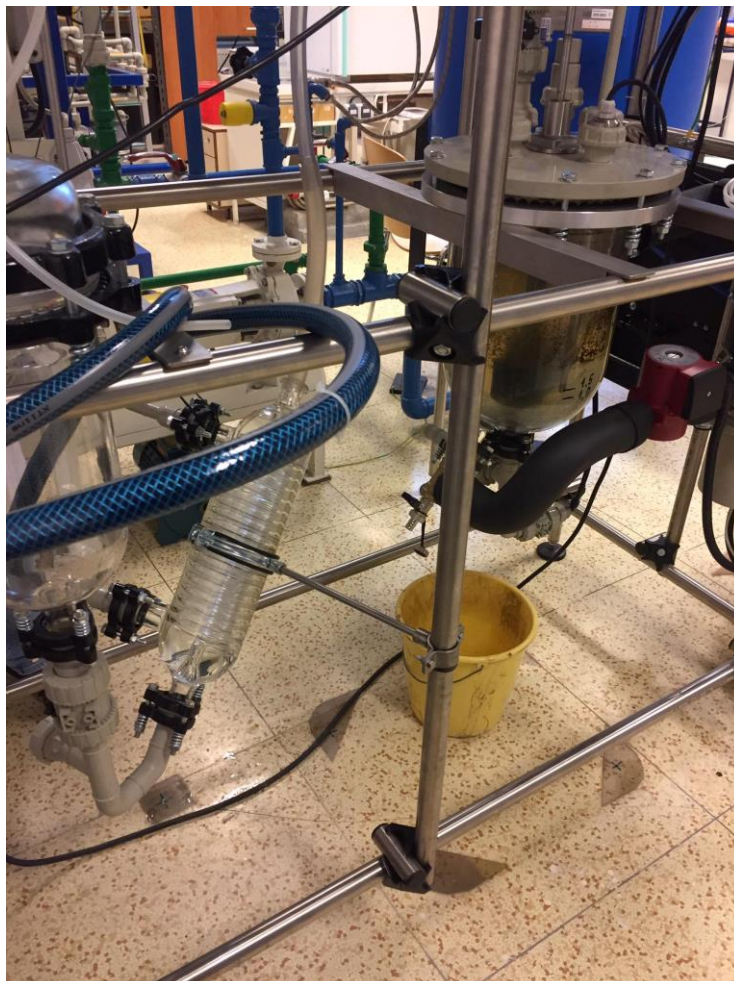
Obě měřicí zařízení zaznamenávala hodnoty do laboratorního programu. Měření bylo provedeno dvakrát. V prvním měření byla použita koncentrace $3 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3}$, objem vsádky $1,5 \text{ dm}^{-3}$, teplota 55 °C a 33 minut. Druhý experiment byl proveden se se stejně koncentrovaným roztokem, avšak po dobu 54 minut a teplotou 45 °C

3.3.5.4 *Měření s fugátem*

Byla provedena tři měření s objemem vsádky $1,5 \text{ dm}^{-3}$. Teplota byla nastavena při prvním měření na 65 °C, při druhém na 60 °C a při třetím na 50 °C. Koncentrace amoniakálního dusíku ve fugátu byla $3535 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$.

3.3.5.5 Měření s absorpcí do kapaliny

V konečném kroku měření na experimentálním striperu bylo původní zařízení přestavěno a za kondenzátor byla připevněna zásobní láhev s absorpčním médiem, kterým plyny z reaktoru probublávaly a byly zachyceny.



Obr. 21 Přestavěný experimentální striper.

Jako vsádka do reaktoru byla použit fugát o koncentraci $3,063 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3}$. První měření bylo provedeno do hydrogensíranu draselného, druhé měření do kyseliny dusičné.

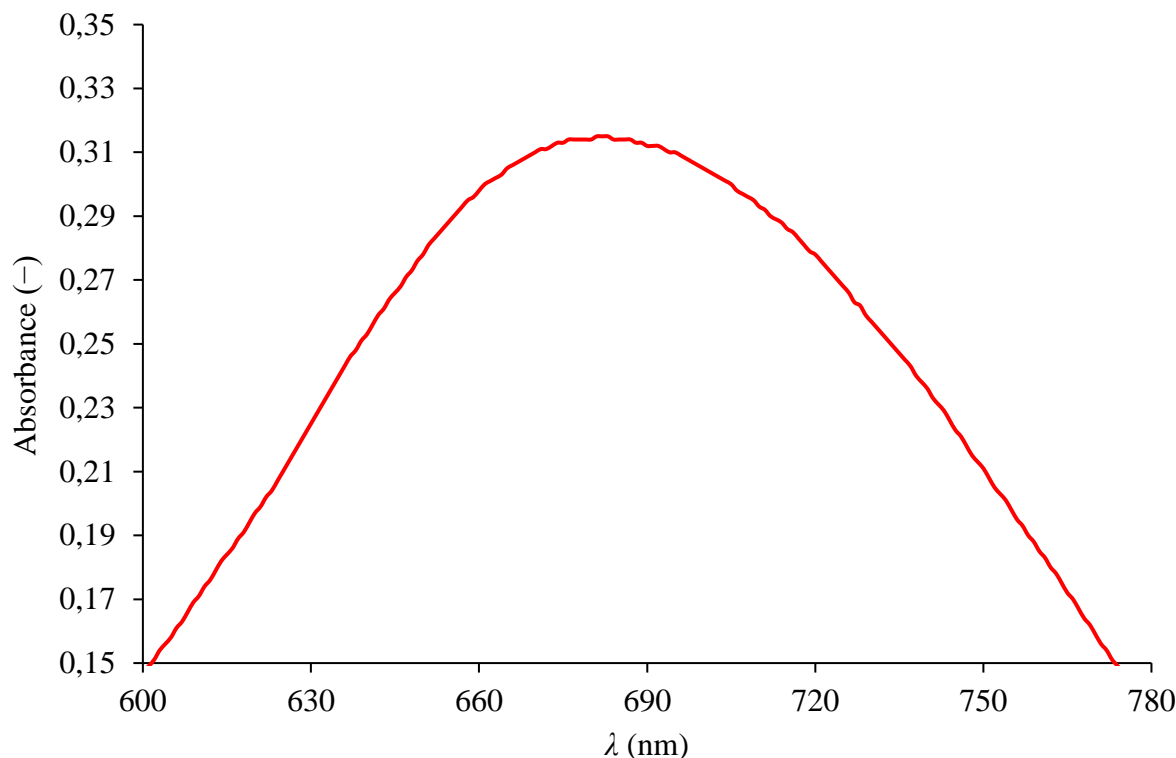
Spuštění stripování spolu s jeho údržbou a funkcemi zůstaly nepozměněné.

4 VÝSLEDKY A DISKUZE

4.1 Kalibrace analytické metody

4.1.1 Měření absorpčního spektra

Měření spektra za účelem zjištění absorpčního maxima kolem vlnové délky 655 nm bylo provedeno se vzorkem o neznámé koncentraci, a to přesně po 60 minutách od smíchání vzorku s vybarvovacími činidly. Vzorek byl analyzován v kyvetě o optické dráze 10 mm.



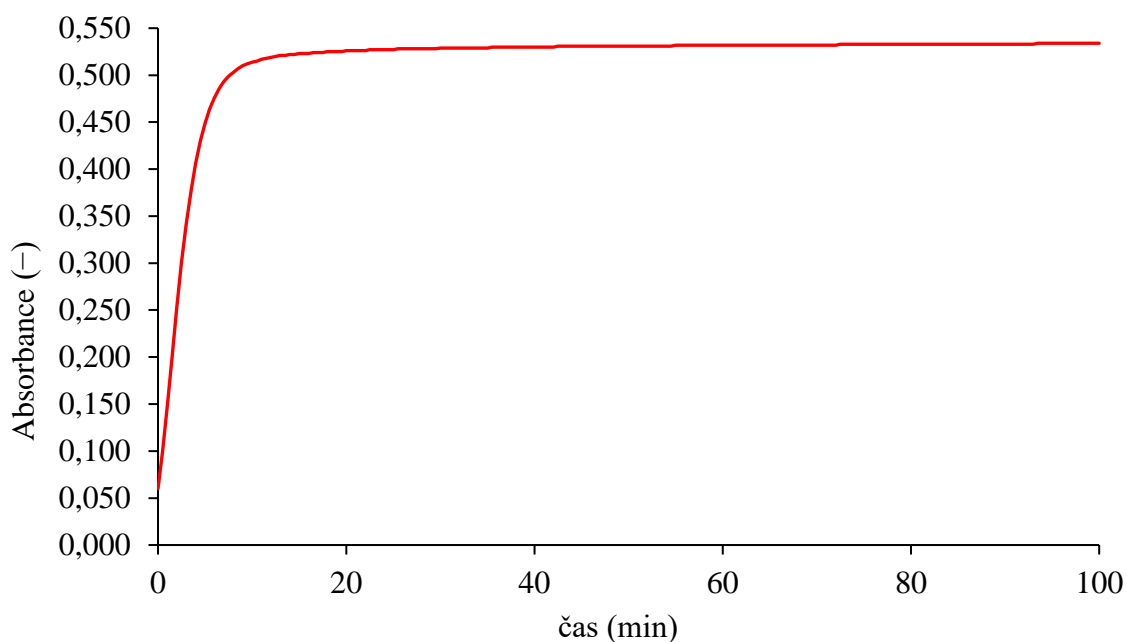
Obr. 22 Hodnoty absorbance kolem vlnové délky 655 nm.

Nejvyšší hodnota absorbance kolem normou dané vlnové délky je při 682 nm. Rozdíl od normou daných 655 nm může být zapříčiněn rozdílnou kvalitou použitých roztoků, rozdílnou úpravou vody a měřícím zařízením.

4.1.2 Měření kinetiky vybarvovací reakce

Před samotným měřením byla zjištěna doba manipulace vzorku po smíchání vybarvovacích činidel se vzorkem, důkladným protřepáním a aplikaci roztoku do kyvety a spektrofotometru. Měření pak probíhalo při vlnové délce 682 nm.

Čas strávený zpracováním vybarvovací směsi byl změřen na 2,5 minuty. Norma ČSN ISO 7544-1 uvádí, že směs může být změřena nejdříve po 60 minutách od smíchání. Analýzou kinetiky vybarvovací reakce bylo zjištěno, že absorbance je konstantní v časech 57,5 minuty od smíchání až po 74,5. minutu po smíchání. Tento rozsah je dostatečně komfortní pro zpracování více vzorků ve stejný čas. Další změna absorbance je v jednotkách tisícín a může být tolerována nejen v rámci fotometrické přesnosti přístroje. Z toho plyne, že manipulace se vzorky může probíhat i v delším časovém intervalu.



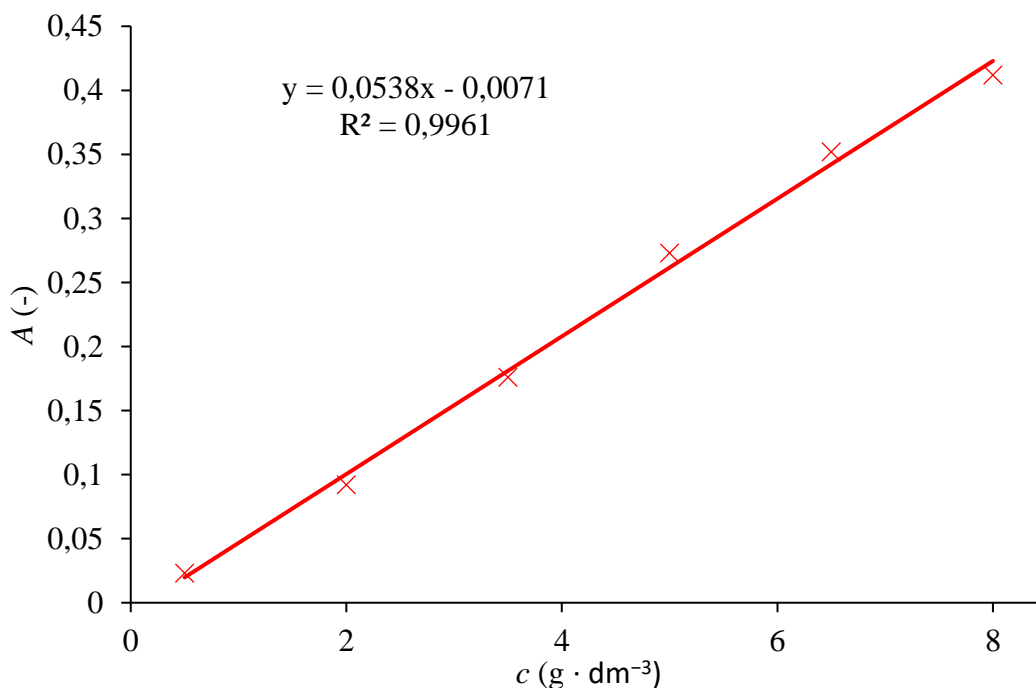
Obr. 23 Kinetika vybarvovací reakce. Čas měřen v rámci pobytu vzorku ve spektrofotometru.

4.1.3 Kalibrační křivka

Z naměřených hodnot byla vypočtena lineární závislost absorbance na koncentraci amoniakálního dusíku. Z použitých koncentrací vyplývá, že pro všechna měření byla použita kyveta o optické dráze 10 mm.

Rovnice přímky kalibrační křivky:

$$y = 0,0538x - 0,0071 \quad (4.1)$$



Obr. 24 Kalibrační křivka spektrofotometrického stanovení amoniakálního dusíku.

Měření slepého vzorku ukázalo na drobnou kontaminaci vody amoniakálním dusíkem. Opětovné proměření pozadí po naměření všech vzorků kalibrační křivky vyšlo na stejné úrovni jako prvotní proměření, signál byl tedy stabilní po celou dobu měření.

4.2 Experimentální měření

4.2.1 Ověření funkčnosti zařízení s laboratorními vzorky

Při prvním měření na stripovacím zařízení byly odebrány 3 vzorky v hodinovém intervalu. Odebírání vzorků se provádělo z jímací nádoby za kondenzátorem. Naměřené hodnoty absorbance zaznamenává *tabulka 11*.

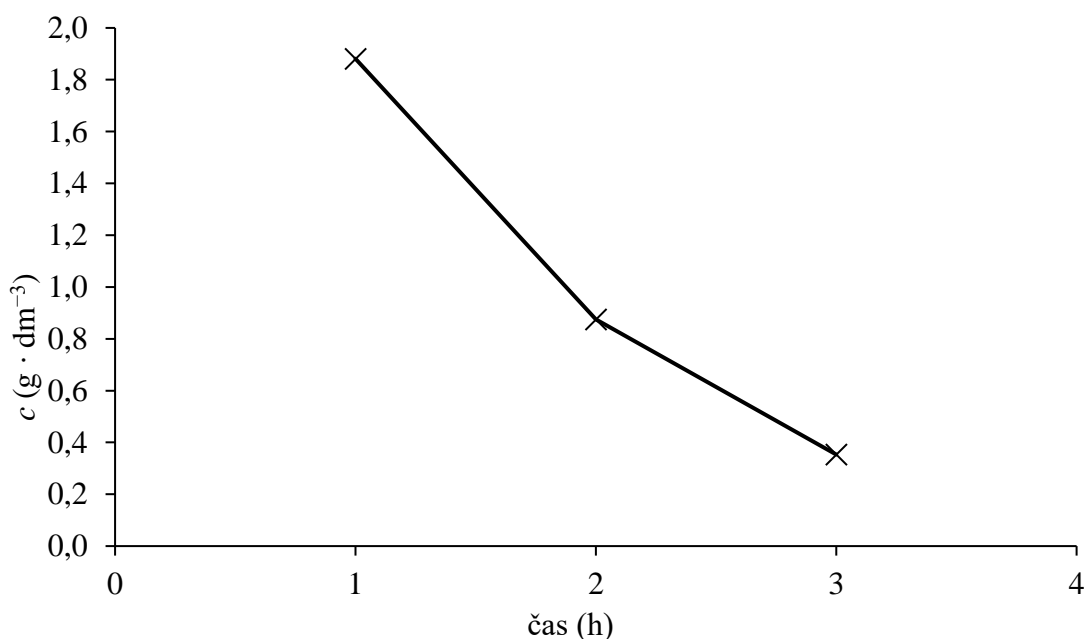
Tabulka 11 Hodnoty absorbance prvního měření.

	blank	1. hodina	2. hodina	3. hodina
A (–)	0,134	0,228	0,275	0,294
$c \text{ (g} \cdot \text{dm}^{-3}\text{)}$	–	1,881	2,755	3,109

Již podle průběžných hodnot absorbance bylo jisté, že ze vsádky reaktoru unikají nejen vodní páry ale i námi separovaný amoniak. Tyto plynné látky z reaktoru unikaly trubicí ke kondenzátoru, kde se postupně ochlazovaly a stékaly do jímacího válce. Z reaktoru ubývalo vsádky a v jímací nádobě přibývalo kondenzátu, avšak ne v rovnoměrně.

Čím víc byl chladič zaplněn zkondenzovanými plyny, tím docházelo k většímu zachytu amoniaku v kondenzátoru. Mohla tudíž nastat situace, zejména ze začátku měření, kdy část par se nestihla zkondenzovat a část plynného amoniaku absorbovat do zkondenzované vody. Tyto látky byly odvedeny vzduchotechnikou mimo zařízení.

Z rozdílů přírůstků koncentrace amoniakálního dusíku v destilátu (*obrázek 25*), spolu se zvyšujícím množstvím zkondenzované vody, je zřejmé zpomalování desorpce v čase důsledkem úbytku volného amoniaku v reaktoru. Protože je volný a vázaný amoniak ve vzájemném vztahu, dochází i v celkové míře i k úbytku amoniaku ve vázané formě.



Obr. 25 Přírůstek koncentrace amoniakálního dusíku v destilátu v čase.

Koncentrace amoniakálního dusíku v destilátu po třech hodinách byla rovna $3,109 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3}$. Původní koncentrace vsádky byla $3 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3}$. Jedná se však o koncentrace z dvou různých objemů. Koncentrace vsádky je vztažena na původní objem $1,5 \text{ dm}^{-3}$, zatímco koncentrace destilátu je část vsádky, prakticky vzato zahuštěná díky desorpci z původního zdroje. Pro ekvivalentní (absolutní) porovnání koncentrací, respektive určení účinnosti desorpce jako separace amoniakálního dusíku ze vsádky, je nutno přepočítat vydesorbované a zkondenzované množství par na objem původního roztoku, nebo vypočítat konkrétní množství amoniakálního dusíku v gramech. Pro tyto potřeby byly v dalším pokusech odečteny i objemy destilátu a zbytku vsádky v reaktoru.

První měření naznačilo, že zařízení je funkční a potvrdilo potřebné předpoklady. Jako největší problémem se jevil okruh výměníku tepla. Tepelný výměník nebyl sto udržet nastavenou teplotu po celou dobu experimentu konstantní. V následujících pokusech se ukázalo, že tento nedostatek i přes veškerou snahu nebylo možné úplně eliminovat.

4.2.2 Měření s laboratorními vzorky

Při každém pokusu byly odebírány tři vzorky, jeden ze vsádky před spuštěním stripování, druhý po ukončení stripování ze vsádky a třetí ze vzniklého destilátu. Byl odečten celkový objem destilátu V_{dest} a objem zbytku vsádky V_{zbytek} . Hodnoty zaznamenává *tabulka 12*.

Tabulka 12 Naměřené hodnoty měření s laboratorními vzorky.

Měření	blank	vsádka začátek	destilát	vsádka konec	Teplota	čas	V_{dest}	V_{zbytek}
Číslo	(–)	(–)	(–)	(–)	(°C)	(min)	(cm ³)	(cm ³)
1	0,14	0,295	0,413	0,235	50	30	150	1340
2	0,14	0,355	0,495	0,265	55	30	160	1330

Přepočtené absorbance na koncentrace a množství amoniakálního dusíku v jednotlivých měření uvádí *tabulka 13*.

Množství amoniakálního dusíku m_N se rovná:

$$m_N = c \cdot V \quad (4.2)$$

kde m_N hmotnost amoniakálního dusíku (g)
 c koncentrace amoniakálního dusíku ($\text{g} \cdot \text{dm}^{-3}$)
 V naměřený objem (dm^3)

Tabulka 13 Přepočet absorbancí na koncentrace a množství amoniakálního dusíku.

měření	$C_{začátek}$	$m_{začátek}$	C_{konec}	m_{konec}	C_{dest}	m_{dest}
číslo	($\text{g} \cdot \text{dm}^{-3}$)	(g)	($\text{g} \cdot \text{dm}^{-3}$)	(g)	($\text{g} \cdot \text{dm}^{-3}$)	(g)
1	3,02	4,52	1,90	2,55	5,21	0,78
2	4,13	6,20	2,46	3,27	6,74	1,08

Z měření vyplývá, že k desorpci dochází u všech zvolených teplot, lze taktéž tvrdit že, se zvyšující teplotou roste i množství odpařené vody ze vsádky.

Účinnost desorpce R_s vypočtená jako rozdíl množství amoniakálního dusíku na začátku a na konci vztažený na počáteční množství shrnuje *tabulka 14*. Tabulka dále uvádí množství

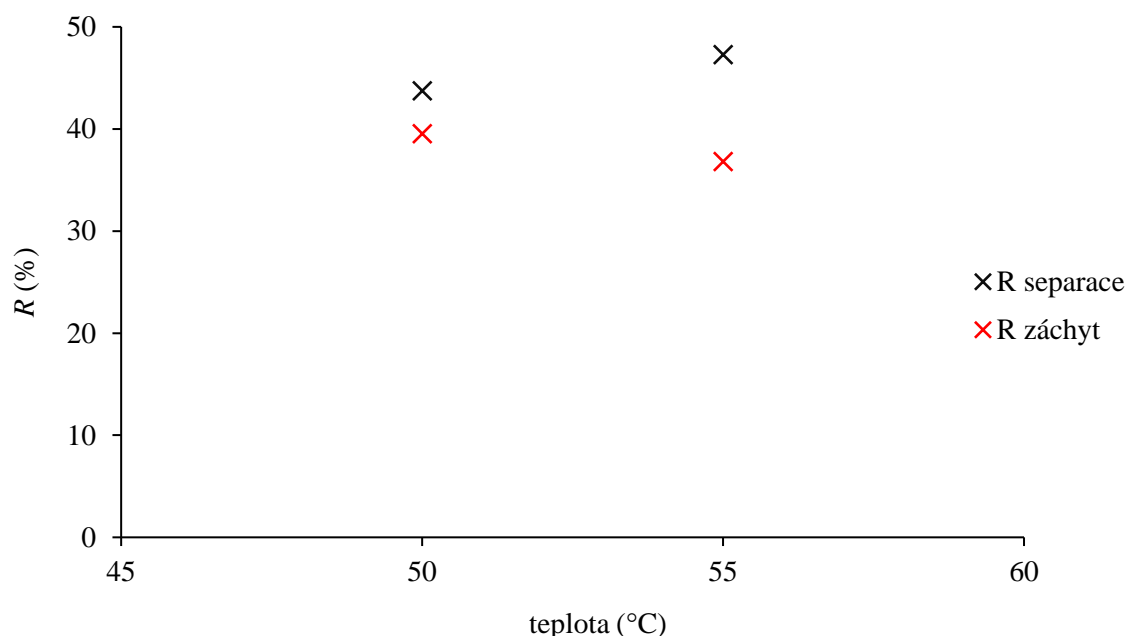
nezachyceného amoniakálního dusíku a $R_{\text{zácht}}$ udává procentuální úspěšnost zachycení vydesorbovaného amoniakálního dusíku.

Tabulka 14 Hodnoty rozdílu množství, účinnosti a množství nezachyceného amoniaku.

měření číslo	Δm (g)	R_s (%)	$m_{\text{nezachycený}}$ (g)	$R_{\text{zácht}}$ (%)
1	1,98	43,7	1,20	39,5
2	2,93	47,3	1,85	36,8

S rostoucí teplotou roste i účinnost separace amoniakálního dusíku, zároveň ale klesá hodnota účinnosti záchytu. Toto množství nezachyceného amoniaku se nestihne absorbovat do kondenzátu v chladiči nebo v potrubí za ním. V důsledku toho mohlo unikat do odtahu větší množství plynů.

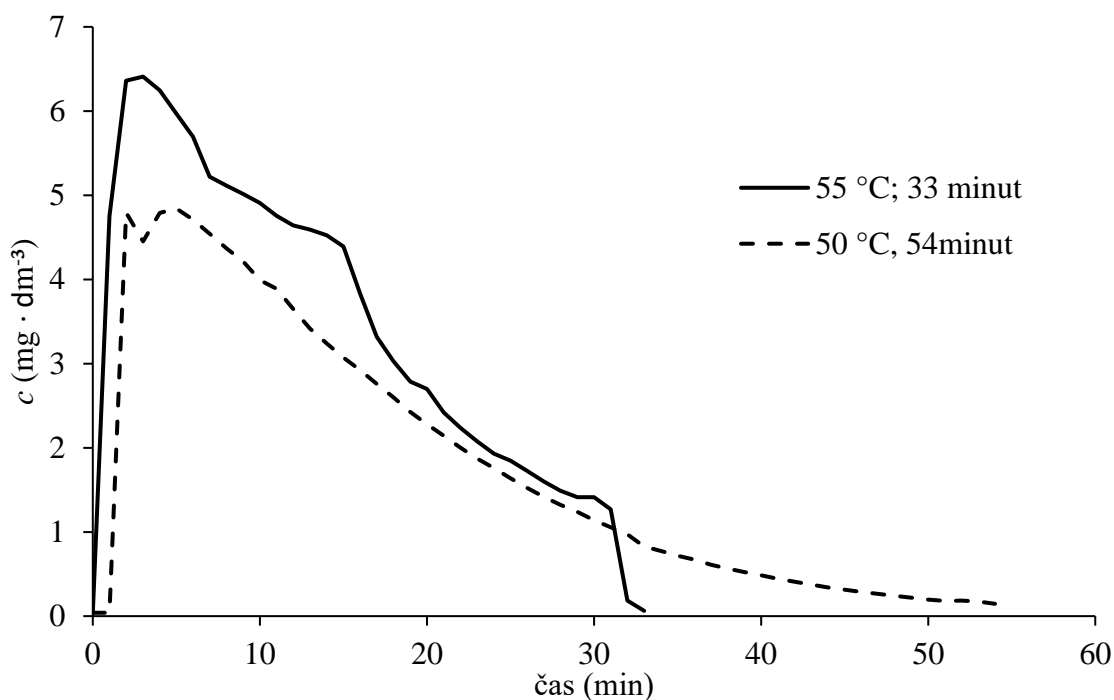
Teplotní závislost účinnosti separace a účinnosti záchytu je znázorněna na *obrázku 26*.



Obr. 26 Závislost účinností separace a záchytu na teplotě.

4.2.3 Měření průtoků plynů a složení par za kondenzátorem

Předcházející měření poukázala na určité množství nezachyceného amoniaku, které odcházelo vzduchotechnikou mimo měřicí zařízení. Pro zjištění jeho kvantity a časového průběhu úniku byla provedena dvě měření. Jejich průběh zachycuje *obrázek 27*. Měření navazovalo na předchozí pokusy s laboratorními vzorky. Roztoky vsádky byly připraveny na koncentraci amoniakálního dusíku $3 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3}$. Objem vsádky $1,5 \text{ dm}^3$. První experiment trval 33 minut při teplotě $55 \text{ }^\circ\text{C}$, druhý experiment s teplotou $50 \text{ }^\circ\text{C}$ trval 54 minut.



Obr. 27 Průběh měření kvantity amoniaku v plynech v odtahu.

Měření prokázala, že s rostoucí teplotou roste i množství nezachyceného amoniaku, a to v důsledku větší míry desorpce z reaktoru. Nejvyšší nezachycená koncentrace měření s vyšší teplotou nastala v rozmezí 3. a 5. minuty, koncentrace v té době se pohybovala okolo $6,4 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$. Po dosažení horní hranice začala postupně koncentrace amoniaku klesat.

V druhém měření opět nastává horní hranice mezi 3. a 5. minutou od spuštění. Dosahuje však menších hodnot, konkrétně $4,8 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$. Menší sedlo v horních hodnotách bylo zřejmě zapříčiněné pohnutím měřicí sondy. Následuje pozvolnější pokles koncentrací než při vyšší teplotě.

Oproti strmému nárustu je patrné pozvolnější klesání naměřených koncentrací po dosažení nejvyšší hodnoty a je zapříčiněno vícero jevy. Na začátku měření je prostor za reaktorem volný, v kondenzátoru se nenachází žádná bariera pro záchyt plynů. Část vydesorbovaného amoniaku se nestihne zachytit do vody a část odpařené vody se nemusí dostatečně zchladit a zkondenzovat. Takto nezkapalné látky mohou pronikat dál do striperu a být ve finále odsáty vzduchotechnikou. Postupně jak se plní kondenzátor a potrubí za ním, vytváří se médium blokující volný pohyb plynů a nutí je se absorbovat do zkondenzovaného média. Vodní páry jsou v kondenzátoru déle zadržovány a mohou se lépe ochladit a zkondenzovat. Tento fakt naznačuje právě pokles naměřené koncentrace v odtahu s postupujícím časem měření. Druhým faktorem ovlivňující množství nezachyceného amoniaku je klesající množství vydesorbovaného amoniaku z reaktoru. Toto množství časem klesá, jak je patrné z obrázku 25.

Během měření kvantity amoniaku v odtahu byla měřena i rychlost proudění za reaktorem. Rychlost proudění v potrubí DN30 byla přepočtena na objemový průtok podle:

$$\dot{V} = S \cdot w \quad (4.3)$$

kde \dot{V} objemový průtok ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
 S plocha průřezu (m^2)
 w rychlost proudění ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Objem prošlého plynu byl vypočten jako:

$$V_p = \dot{V} \cdot t \quad (4.4)$$

kde V_p objem prošlého plynu (m^3)
 t čas (min)

Rozdíl prošlého objemu stripovacího plynu na probublávání a prošlého objemu plynu za reaktorem:

$$\Delta V_p = V_{p1} - V_{p2} \quad (4.5)$$

kde V_{p1} objem prošlého plynu za reaktorem (m^3)
 V_{p2} objem přivedeného stripovacího plynu (m^3)

Tabulka 15 zaznamenává naměřené hodnoty průtoků plynu, objemy a rozdíl objemů prošlých plynů za dobu měření za reaktorem a stripovacího plynu. Průtok stripujícího plynu byl ve všech měření $25 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$.

Tabulka 15 Hodnoty měření průtoků a vypočtené objemy.

Teplota (°C)	t (min)	w ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	S (m^2)	\dot{V}_{p1} ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	V_{p1} (m^3)	\dot{V}_{p2} ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	V_{p2} (m^3)	ΔV_p (m^3)
55	33	2,7	0,002 8	0,007 6	15,116	0,000 42	0,832	14,284
45	54	2,7	0,002 8	0,007 6	24,734	0,000 42	1,361	23,374

Rozdíl prošlého objemu potvrzuje dalším měřením, že experimentální zařízení funguje správně a dochází k desorpci ze vsádky. Veličina V_{p2} udává spotřebu stripujícího plynu za měření. Její velikost může být nápomocná při využití tlakových láhví jako zásobníků pro stripovací plyn.

4.2.4 Měření s fugátem

Pokusy s laboratorními vzorky prokázaly funkčnost experimentálního striperu. Pro další postup byly roztoky amoniaku nahrazeny fugátem dovezenou z bioplynových stanic. Fugát je odpadní tekutá látka z bioplynové stanice, vzniklá výrobou plynu z kejdy. Kejda je produkt živočišné výroby, směs tekutých a tuhých výkalů, vody a částečně steliva. Fugát jsou zároveň bohatý na amoniakální dusík.



Obr. 28 Reaktor naplněný fugátem.

Koncentrace amoniakálního dusíku ve fugátu pro toto měření byla $3,535 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3}$. Na základě těkavosti amoniaku se jeho koncentrace mohla v průběhu skladování a manipulování mírně snížit. V důsledku nemožnosti přímého stanovení koncentrace amoniakálního dusíku ve fugátu spektrofotometrickou metodou byly odebírány vzorky pouze z jímací nádoby za kondenzátorem.

Naměřené hodnoty shrnuje *tabulka 16*.

Tabulka 16 Naměřené hodnoty experimentu s fugátem.

měření číslo	teplota (°C)	čas (min)	destilát (–)	V_{dest} (cm ³)	V_{zbytek} (cm ³)
1	65	45	0,599	240	1250
2	60	45	0,531	215	1280
3	50	45	0,463	200	1290

Z naměřených hodnot je patrné, že s rostoucí teplotou roste sledovaná absorbance destilátu. Zároveň roste i množství destilátu, zákonitě klesá i množství zbylého fugátu v reaktoru. Roztok destilátu byl mírně zbarven do žluta, avšak tento lehký barevný odstín podle použité metody stanovení byl zanedbatelný. Zbarvení je způsobené kondenzací a zachytem i jiných látek než amoniaku, na které je fugát bohatý. Jedná se o silně těkavé aromatické látky, které jsou například charakteristické pro typický zápach fugátu (kejdy). Destilát je tedy oproti měření s laboratorními vzorky složen nejen z vody a amoniaku, ale i mnohých jiných látek.

V *tabulce 17* jsou hodnoty vypočtených koncentrací a účinnosti.

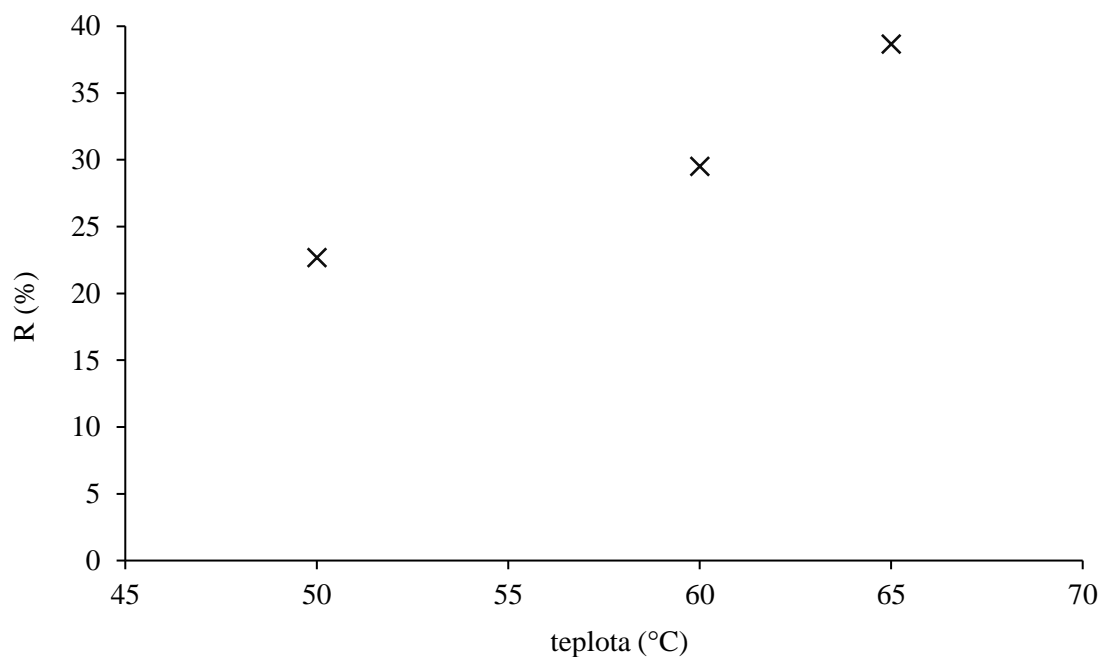
Tabulka 17 Vypočtené hodnoty koncentrací amoniakálního dusíku a účinnosti měření s fugátem.

teplota (°C)	$C_{začátek}$ (g · dm ⁻³)	$m_{začátek}$ (g)	C_{dest} (g · dm ⁻³)	m_{dest} (g)	R (%)
65	3,54	5,30	8,54	2,05	38,659
60	3,54	5,30	7,28	1,56	29,503
50	3,54	5,30	6,01	1,20	22,673

Zvýšení teploty vede ke zvýšení účinnosti separace amoniakálního dusíku z fugátu a ke zvýšení jeho zachytu. Zvýšené hodnoty zachyceného amoniakálního dusíku je důsledek desorpce i jiných látek z fugátu, které dříve zaplňovaly kondenzátor a vytvářely tak bariéru pro další plyny. Ke zvýšení účinnosti a množství vyseparovaného amoniakálního dusíku vede vyšší teplota průběhu experimentu a delší časový průběh měření. Díky neanalyzovanému zbytku v reaktoru nelze přesně hodnoty interpretovat. Avšak lze považovat experiment za prokazatelně účinný.

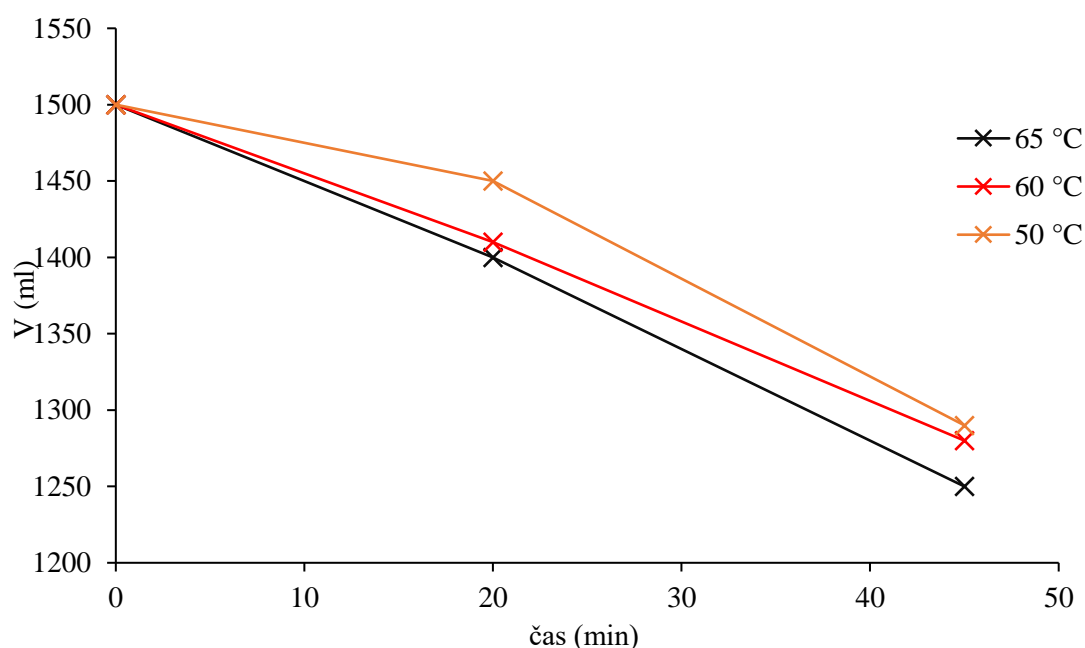
Typický zápach fugátu byl podle subjektivního olfaktometrického hodnocení méně výrazný než před stripováním a to i přes zvýšenou teplotu fugátu po měření.

Účinnost separace v závislosti na teplotě je znázorněna na *obrázku 29*.



Obr. 29 Závislost účinnosti na teplotě při měření s fugátem.

Kromě účinnosti separace byly sledovány ještě hodnoty úbytku objemu fugátu v reaktoru. Závislost objemu fugátu na čase je znázorněna obrázkem 30.



Obr. 30 Závislost objemu fugátu v reaktoru na čase.

Ze závislosti vyplývá větší nárůst úbytku objemu fugátu až po 20. minutě stripování. S rostoucí teplotou roste i úbytek objemu v důsledků většího vypařování zejména vody.

Pro teplotu 50 °C v prvních 20 minutách ubýval objem průměrně rychlostí $2,5 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$, při teplotě 60 °C $4,5 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ a při 65 °C $5 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$. Tyto výsledky byly podle očekávání. V druhé části měření, v časech mezi 20. a 45. minutou, nejrychleji ubývalo objemu při teplotě

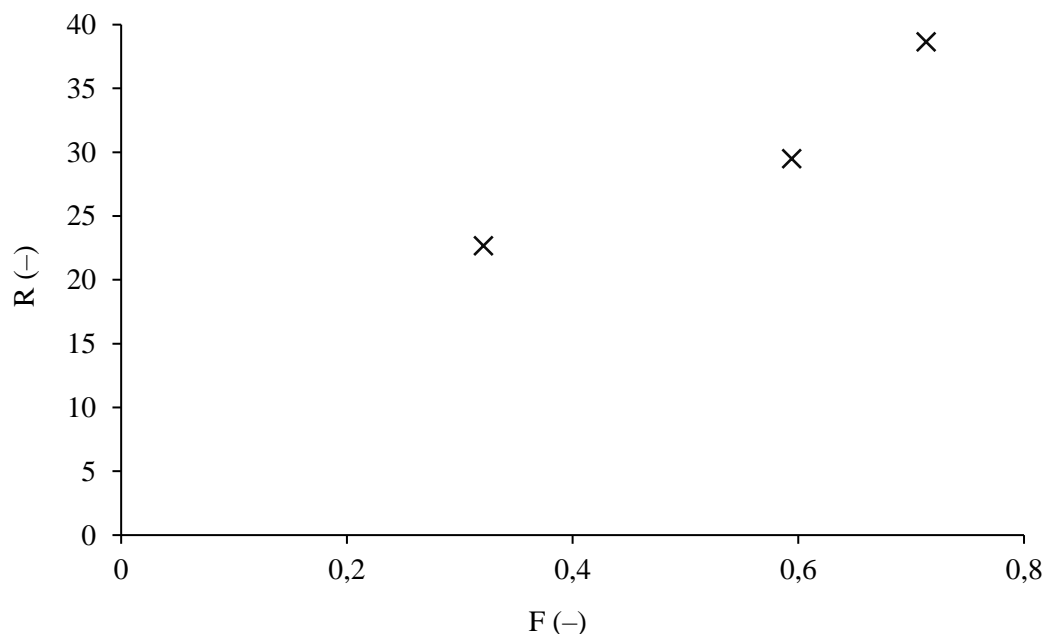
50 °C, konkrétně $6,4 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$. Při teplotě 60 °C ubývalo objemu rychlostí $5,2 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$, rychlost úbytku při teplotě 65 °C byla $6 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$. Nesourodost výsledků v druhé části byla nejspíše zapříčiněna nestabilním ohřevem tepelným okruhem.

Podle rovnice (2.60) byly vypočteny změny zastoupení nevázané formy NH_3 ve fugátu v závislosti na teplotě. Původní pH fugátu bylo stanoveno na 7,5, teplota 20 °C. Výsledky shrnuje tabulka 18.

Tabulka 18 Zastoupení nevázané formy amoniaku ve fugátu v závislosti na teplotě.

T (°C)	F (–)
20	0,012
50	0,333
60	0,606
65	0,725

Z rozdílů zastoupení volného amoniaku je velmi patrný razantní skok mezi 50 a 60 °C. Takřka dvojnásobek zastoupení volné formy NH_3 při zvýšení teploty o 10 °C je dostatečný argument, pro uplatnění vyšších teplot i s ohledem na ekonomickou stránku provozu. Experiment znovu prokázal závislost účinnosti separace na teplotě. Porovnání změny zastoupení nevázané formy amoniaku na účinnosti je znázorněn na obrázku 31.



Obr. 31 Závislost účinnosti na změně zastoupení nevázané formy amoniaku.

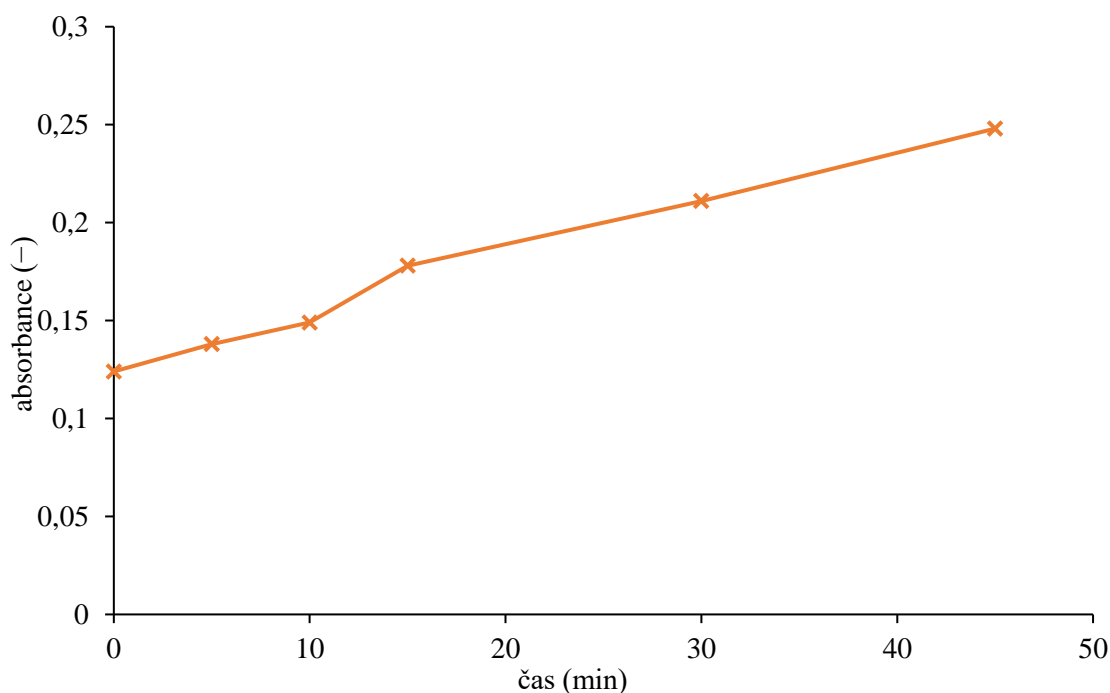
4.2.5 Měření s absorpcí do kyselin

Měření probíhalo s fugátem o koncentraci $3,063 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3}$. Absorpční nádoba byla naplněna médiem o koncentraci $1 \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ a o objemu 2 dm^{-3} . Obě měření byla provedena s nastavenou teplotou 60 °C. Bohužel díky odebíráním vzorků, změnám objemu a možným rušivým vlivům absorpčního roztoku, nejsou hodnoty absorbance vhodné pro výpočty přesné koncentrace, avšak jsou postačující k porozumění dějů uvnitř absorpčního roztoku.



Obr. 32 Proublávání absorpčního média.

Nárůst absorbance v čase je vynesen v *obrázku 33*. Z nárůstu je patrné, že dochází k absorpci vydesorbovaného amoniakálního dusíku do absorpčního média. Dochází taktéž k zachytu dalších sloučenin, zejména aromatického charakteru, protože absorpční médium po dokončení stripování vykazovalo zápach typický pro fugát.



Obr. 33 Závislost absorbance na čase.

Druhé měření probíhalo na kyselinu dusičnou. Objem fugátu v reaktoru 1,5 dm³. Teplota 60 °C. Doba stripování 30 minut. Pro tento experiment byl odebrán vzorek z reaktoru po dokončení stripování a byl externě analyzován. Tato hodnota poskytuje přesnou informaci o míře desorpce.

Tabulka 19 Hodnoty koncentrace a hmotnosti amoniakálního dusíku v reaktor a jeho objem.

čas (min)	c_N (g · dm ⁻³)	V (dm ³)	m_N (g)
0	3,06	1,5	4,595
20	2,23	1,27	2,837
30	1,94	1,1	2,137

Z časového průběhu vyplývá jasná míra desorpce během měření. Celkové množství vydesorbovaného amoniakálního dusíku činí 2,46 g, což představuje účinnost 53,49 %.

4.3 Diskuse výsledků

Provedená měření prokázala funkčnost experimentálního striperu při desorpci amoniaku z roztoků. Měření bylo rozděleno do několika částí, tak aby se vyzkoušely roztoky laboratorní i z technické praxe. Během pokusů se kladl důraz na zjištění nedokonalostí experimentálního zařízení a v návaznosti na ně i k přestavbě původního striperu.

Při měření s laboratorními vzorky, byly provedeny dvě série měření. Při první sérii se testovala základní funkčnost striperu, zejména tepelný okruh, míchadlo a přívod stripovacího plynu. U stripování trvající 3 hodiny byl sledován průběh nárůstu absorbance kondenzátu v čase. Z naměřených dat vyplývá největší nárůst v první hodině, poté klesá. Z toho lze usoudit, že účinnost desorpce je nejvyšší ze začátku. Delší stripování sice vede k většímu výtěžku, ale zároveň rostou náklady na provoz, protože se vsádka musí kontinuálně zahřívat, míchat

a probublávat. Protože zařízení není kontinuální, prodloužila by se i doba mezi jednotlivými vsádkami. Tyto okolnosti by vedly k ekonomické neúčinnosti zařízení, hlavně tehdy pokud je úkolem vydesorbovat (vyseparovat) pouze určité množství látky.

V dalším kroku byla měření zkrácena na 30 minut a sledována byla závislost účinnosti na teplotě. Bylo prokázáno, že s rostoucí teplotou roste účinnost separace, ale klesá účinnost zachytu vyseparovaného amoniaku. Největší podíl na tom má změna rovnováhy mezi vázanou a nevázanou formou amoniaku, kdy se zvyšující se teplotou roste zastoupení nevázané formy, která se desorpuje, viz kapitola 2.3.

Roste i množství zkondenzované kapaliny. Z rozdílů finálních koncentrací v reaktoru a kondenzátu vyšlo najevo, že část vydesorbovaného amoniaku není zachyceno ve vzniklém destilátu. Toto množství bylo podrobeno kvantitativní analýze. Naměřená maximální koncentrace byla $6,4 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3}$. Klesající trend úspěšnosti zachytu vydesorbovaného amoniaku, hlavně ze začátku měření, je důsledkem většího množství nevázaného amoniaku v reaktoru, které je ze začátku vydesorbované aniž by se mohlo absorbovat ve vypařené a zkondenzované vodě.

Protože největším zdrojem znečištění ovzduší amoniakem je zemědělství, konkrétně chovy hospodářských zvířat (ze kterého pochází i vzorky fugátu) a používání minerálních dusíkatých hnoj [57], byly hodnoty koncentrace nezachyceného amoniaku porovnány s obecnými emisními limity. Pokud se jedná o stacionární chov s emisí amoniaku nad 5 tun za rok, je limit hmotností koncentrace amoniaku vypouštěného $50 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ [58].

Množství unikajícího amoniaku podpořilo myšlenku přebudovat dosavadní systém striperu s kondenzováním na systém s absorpcí do absorpčního média. Později tak bylo učiněno přidáním nádoby s absorpčním médiem za kondenzátor, který v tom případě plnil roli pouze spojovací.



Obr. 34 Porovnání striperu po přestavbě (vlevo) a před úpravou (vpravo).

Před měřením s absorpcí proběhlo ještě poměření stripování s fugátem. Byly voleny nejvyšší teploty z celé experimentální části. Při 65°C byla naměřena účinnost 38,66 %, jednalo se však o účinnosti zachycení vydesorbovaného amoniaku, přesnou účinnost separace se nepodařilo zjistit, protože nebyla stanovena koncentrace vsádky po ukončení měření. Potvrdilo se, že zvýšení teploty vede k nárustu účinnosti. Zvýšení o desítky stupňů navyšuje procentuální účinnost o desítky procent. Při tomto měření se z fugátu dostávaly do destilátu i jiné látky, zejména aromatické sloučeniny zapříčiňující charakteristický zápach fugátu. Tyto látky mohly

způsobit slabou barevnou změnu kondenzátu. Byl pozorován i úbytek fugátu v reaktoru. Čím vyšší byla teplota, tím více ubylo fugátu a přibýlo kondenzátu. Větší úbytek fugátu by mohl vést například k obnažení míchacích lopatek a k poklesu účinnosti míchání.

Měření s absorpcí probíhalo s fugátem o koncentraci $3,063 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3}$. U měření do KHSO_4 , nebylo možné přesně určit absorbované množství, postačilo ale k potvrzení, že se vydesorbované látky z fugátu absorbují. Absorpční médium po měření vykazovalo zápach podobný zápachu fugátu. U měření do kyseliny dusičné byly odebírány vzorky fugátu z reaktoru. Odebrané vzorky byly externě analyzovány na elektroforéze. Při tomto měření byla účinnost separace 53,49 %. Metoda naprosto prokazatelně posloužila k určení množství vydesorbovaného amoniaku a účinnosti separace. Avšak stejně jako u předchozí měření nebylo možné zjistit přesné množství zachycených látek do absorpčního média.

Všechny provedené experimenty prokázaly funkčnost zařízení. Během měření byly zjištěny některé nedokonalosti a byly získány cenné poznatky směrem k vylepšení zařízení. K navýšení přesnosti měření by vedla změna tepelného okruhu, která by vedla k stabilnějšímu ohřevu vsádky.

4.3.1 Porovnání metody se separací na membránovém kontaktoru

Tato práce svojí problematikou navazuje na autorovu bakalářskou práci [59]. Bakalářská práce studuje problematiku separace amoniaku ze čpavkové vody a fugátu pomocí membránového kontaktoru s horizontálně orientovanými membránovými vlákny. Poznatky nabyté z měření bakalářské práce byly využity pro řešení práce diplomové. Nedostatky membránového kontaktoru, zejména zanášení vláken fugátem a špatná údržba membránového modulu, zde byly úplně odstraněny. Dále odpadla nutnost úpravy pH roztoku pomocí hydroxidů, protože k separaci docházelo pouze při vyšší koncentraci amoniaku ve volné formě (vyšší pH). Při použití desorpce byla funkce změny pH pomocí zásad nahrazena ohřevem vsádky.

Největším přínosem stripovacího způsobu separace byl nárůst účinnosti separace z výchozího média. Účinnost při separaci na kontaktoru rostla s množstvím přidané zásady, ale i tak nejvyšší naměřená účinnost separace z fugátu byla 12,91 %. Při stripování fugátu byla maximální účinnost minimálně trojnásobná. Při měření s laboratorními vzorky byla účinnost separace na experimentálním striperu větší o 20 %. V absolutních hodnotách se podařilo na 1 dm^3 z fugátu dostat při stripování 1,64 g amoniaku, při separaci na membránovém kontaktoru 0,24 g.

Porovnáním obou metod vychází z pohledu účinnosti i provozně lépe využívat k separaci z fugátu stripovací zařízení. Mezi negativa striperu patří nutnost ohřevu vsádky ke zvýšení účinnosti a teoretické nezachycení všech produktů separace.

5 ZÁVĚR

Diplomová práce je v teoretické části zaměřena na studium problematiky desorpce. Ta je rozdělena na jednotlivé typy a je konkrétně vztažena na desorpci amoniaku z vodního prostředí. Dále jsou v teoretické části rozepsány činitele nejvíce ovlivňující účinnost desorpce. Mezi ně patří zejména teplota a pH roztoku. Vliv pH pro desorpci amoniaku je zásadní, protože se zvyšující se hodnotou pH roste zastoupení volného amoniaku, který je k desorpci náchylný. S rostoucí teplotou roste zastoupení volného amoniaku při stejném pH, a to v přímé návaznosti na snižující se rozpustní plynu v závislosti na zvyšující se teplotě. V teoretické části je začleněna kapitola o absorpci, která stručně popisuje proces desorpci opačný. Dále jsou rozebrány analytické metody stanovení amoniaku a stripovací věže, které jsou využívány k procesům desorpce.

Praktická část byla provedena na experimentálním striperu postaveném firmou MVB Opava ve spolupráci s Chemickou fakultou VUT. Zařízení bylo nově sestaveno a bylo potřeba uskutečnit testy jeho funkčnosti. Během měření diplomové práce bylo zařízení i dodatečně upraveno a rozšířeno o nádobu s absorpčním médiem. Hlavním sledovaným kritériem během měření byla účinnost desorpce, jakožto účinnost separace amoniaku z jeho roztoků.

Prováděná měření byla uskutečněna s laboratorními vzorky připravenými z čistých chemikálií a se vzorky fugátu využívané v technické praxi. Experimenty s laboratorními vzorky byly koncipovány, aby se svojí koncentrací amoniaku blížily k roztokům s fugátem. Měření s laboratorními vzorky prokázala zvyšující se účinnost desorpce se zvyšující se teplotou v reaktoru. Při teplotě 55 °C byla naměřena největší účinnost separace amoniaku. Ze vsádky po 30minutovém experimentu bylo separováno 47,3 % amoniaku. Časově delší měření prokázalo, že po hodině měření dochází k poklesu nárustu vyseparovaného amoniaku. Měření demonstrovala dva nedostatky sestaveného striperu. Okruh ohřevu projevoval nestabilitu ohřevu a často nebyl schopen udržet po celou dobu měření rovnoměrnou teplotu. Druhým nedostatek byl únik nezachyceného amoniaku do odtahu za kondenzátorem. Toto množství bylo podrobena analýze a na základě výsledků bylo zařízení později přestavěno.

Měření s fugátem bylo provedeno až do teploty 65 °C, při které byla naměřena i největší účinnost, 38,66 %. Jednalo se však o účinnost zachytu vydesorbovaného amoniaku, protože přesná koncentrace amoniaku ve fugátu po měření nemohla být stanovena. Lze tudíž očekávat, že reálná účinnost byla vyšší.

Po přestavbě zařízení byla provedena měření s absorpcí do kyselin. U měření byla prokázána absorpce amoniaku do absorpčního média. Účinnost separace při 60 °C dosahovala hodnot 53,49 %.

Experimentální část jednoznačně prokázala funkčnost stripovacího zařízení. Potvrdila teorii, že účinnost desorpce se razantně zvyšuje s rostoucí teplotou. Na druhou stranu byly odhaleny nedostatky stripovacího zařízení jako nespolehlivý tepelný okruh a riziko úniku vydesorbovaných plynů. Naměřená data, získané poznatky a zkušenosti dávají prostor pro inovace a vylepšení stávajícího zařízení.

Budoucnost je k využití desorpce pomocí stripování příznivá, protože zařízení kombinuje vysokou účinnost, malé provozní náklady a stabilitu.

6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] SEADER, J. D. a Ernest J. HENLEY. *Separation process principles* [online]. 2nd ed. Hoboken: John Wiley, 2006 [cit. 2020-10-23]. ISBN 04-714-6480-5. Dostupné z: <https://www.academia.edu/>
- [2] BAŞAKÇILARDAN-KABAKCI, Sibel, A. Nursen İPEKOĞLU a İlhan TALINLI. Recovery of Ammonia from Human Urine by Stripping and Absorption. *Environmental Engineering Science* [online]. 2007, **24**(5), 615-624 [cit. 2020-10-20]. ISSN 1092-8758. Dostupné z: doi:10.1089/ees.2006.0412
- [3] SARACCO, G. a G. GENON. High temperature ammonia stripping and recovery from process liquid wastes. *Journal of Hazardous Materials* [online]. 1994, **37**(1), 191-206 [cit. 2020-10-22]. ISSN 03043894. Dostupné z: doi:10.1016/0304-3894(94)85048-8
- [4] KUNESH, John G., Thomas P. OGNISTY, Michaharu SAKATA a Guang X. CHEN. Sieve Tray Performances for Steam Stripping Toluene from Water in a 4-ft Diameter Column. *Industrial & Engineering Chemistry Research* [online]. 1996, **35**(8), 2660-2671 [cit. 2020-10-23]. ISSN 0888-5885. Dostupné z: doi:10.1021/ie950760w
- [5] KOHL, Arthur a Richard NIELSEN. *Gas Purification*. 5th. Houston, Texas: Gulf Professional Publishing, 1997. ISBN 978-0884152200.
- [6] Moving Valve Tray. In: *Mte-process* [online]. 3255 MC Oude-Tonge: mte-process, 2020 [cit. 2020-10-31]. Dostupné z: https://mte-process.com/wp-content/uploads/2018/07/Moving_valve_tray-2.png
- [7] Bubble Cap Tray. In: *IndieMart* [online]. 2019 [cit. 2020-10-31]. Dostupné z: <https://5.imimg.com/data5/UC/KR/MY-2808544/distillation-column-tray-500x500.jpg>
- [8] Structured packing. In: *IntraProcess* [online]. 2020 [cit. 2020-11-01]. Dostupné z: http://intra-process.com/images_public/main/products/intra-pack-pg.jpg
- [9] Random column packing. In: *Munters* [online]. 2020 [cit. 2020-10-31]. Dostupné z: <https://www.munters.com/en/munters/products/mass-transfer/random-packings/>
- [10] ZARZYCKI, Roman a Andrzej CHACUK. *Absorption: fundamentals and applications*. Oxford: Pergamon Press, c1993. ISBN 00-804-0262-3.
- [11] DANCKWERTS, P. *Reakce v soustavě plyn-kapalina*. 1. vydání. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1975. Metody a pochody chemické technologie
- [12] CHATTOPADHYAY, P. *ABSORPTION AND STRIPPING*. Kolkata: Asian Books Private Limited, 2007. ISBN 9788184120332.
- [13] FAIR, James R. a Henry Z. KISTER. Absorption (Chemical Engineering). *Encyclopedia of Physical Science and Technology* [online]. Elsevier, 2003, 2003, **3rd Edition**(1), 1-25 [cit. 2020-10-28]. ISBN 9780122274107. Dostupné z: doi:10.1016/B0-12-227410-5/00001-6

- [14] DOJČANSKÝ, Ján a Jaroslav LONGAUER. *Chemické inžinierstvo II: difúzne procesy, prestup látky, absorpcia, adsorpcia, destilácia a rektifikácia, extrakcia, úprava vzduchu a chladenie vody, sušenie, kryštalizácia, membránové procesy*. Bratislava: Malé Centrum, 2000. ISBN 80-967-0648-9.
- [15] CUSSLER, E. L. *Diffusion: mass transfer in fluid systems*. Third edition. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2009. ISBN 978-052-1871-211.
- [16] KALIVODA, Josef *Odstraňování plynných polutantů ze vzdušnin na poloprovozní pračce*: disertační práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, Ústav chemie materiálů, 2017. 216 s. Školitel doc. Ing. Tomáš Svěrák, CSc
- [17] Ammonia Removal Model Based on the Equilibrium and Mass Transfer Principles. *Bulletin of the Korean Chemical Society* [online]. 2008, **29**(3), 555-561 [cit. 2020-10-16]. ISSN 0253-2964. Dostupné z: doi:10.5012/bkcs.2008.29.3.555
- [18] HIKITA, Haruo, Satoru ASAI a Yasuhiro KONISHI. A criterion for gas supersaturation in simultaneous absorption and desorption with an instantaneous irreversible reaction. *Chemical Engineering Science* [online]. 1988, **43**(10), 2907-2910 [cit. 2020-11-01]. ISSN 00092509. Dostupné z: doi:10.1016/0009-2509(88)80037-x
- [19] LANDAU, J. Desorption with a chemical reaction. *Chemical Engineering Science* [online]. 1992, **47**(7), 1601-1606 [cit. 2020-11-04]. ISSN 00092509. Dostupné z: doi:10.1016/0009-2509(92)85008-Y
- [20] WINKELMAN, J.G.M. a A.A.C.M. BEENACKERS. Simultaneous absorption and desorption with reversible first-order chemical reaction: analytical solution and negative enhancement factors. *Chemical Engineering Science* [online]. 1993, **48**(16), 2951-2955 [cit. 2020-11-04]. ISSN 00092509. Dostupné z: doi:10.1016/0009-2509(93)80040-W
- [21] SRINATH, Embar a Raymond LOEHR. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, vol. 46, no. 8, 1974, pp. 1939–1957. JSTOR. ISSN 00431303. [cit. 2020-10-22]. Dostupné z: www.jstor.org/stable/25038213
- [22] ČSN ISO 7150-1 *Jakost vod. Stanovení amonných iontů. Část 1: Manuální spektrometrická metoda*. Praha: Český normalizační institut, 1994.
- [23] TSONOPOULOS, Constantine, Dale M. COULSON a Lawrence B. INMAN. Ionization constants of water pollutants. *Journal of chemical and engineering data*. 1976, **21**(2), 190-193. ISSN 0021-9568. Dostupné z: doi:10.1021/je60069a008.
- [24] BANDURA, Andrei V. a Serguei N. LVOV. The Ionization Constant of Water over Wide Ranges of Temperature and Density. *Journal of Physical and Chemical Reference Data* [online]. 2006, **35**(1), 15-30 [cit. 2020-10-14]. ISSN 0047-2689. Dostupné z: doi:10.1063/1.1928231

- [25] PATOCZKA, Jerzy a David J. WILSON. Kinetics of the Desorption of Ammonia from Water by Diffused Aeration. *Separation Science and Technology* [online]. 2006, **19**(1), 77-93 [cit. 2020-10-18]. ISSN 0149-6395. Dostupné z: doi:10.1080/01496398408059939
- [26] GUŠTIN, Simon a Romana MARINŠEK-LOGAR. Effect of pH, temperature and air flow rate on the continuous ammonia stripping of the anaerobic digestion effluent. *Process Safety and Environmental Protection* [online]. 2011, **89**(1), 61-66 [cit. 2020-10-18]. ISSN 09575820. Dostupné z: doi:10.1016/j.psep.2010.11.001
- [27] SMITH, Paul. G. a Faxz G. ARAB. The role of air bubbles in the desorption of ammonia from landfill leachates in high pH aerated lagoon. *Water, Air, and Soil Pollution*. 1988, **38**, 343-343.
- [28] MÍKA, Vladimír a Lubomír NEUŽIL. *Chemické inženýrství. II*. Praha: VŠCHT, 1993, 375 s. ISBN 80-7080-170-0.
- [29] *NIOSH Method 6015: Ammonia, Manual of Analytical Methods*. 4. vyd. Washington DC.: National Institute for Occupational Safety and Health, 1994.
- [30] MUSILOVÁ, Bc. Barbora. *Metody stanovení iontů dusíku ve vodě a stabilita výsledných hodnot*. Brno, 2015. Diplomová práce. Mendlova Univerzita v Brně.
- [31] HORÁKOVÁ, Marta. *Analytika vody* [online]. 2., oprav. a rozšíř. vyd. Praha: VŠCHT, 2003 [cit. 2021-03-03]. ISBN 978-80-7080-520-6. Dostupné z: https://vydavatelstvi.vscht.cz/katalog/publikace?uid=uid_isbn-978-80-7080-520-6
- [32] KROM, Michael D. Spectrophotometric determination of ammonia: a study of a modified Berthelot reaction using salicylate and dichloroisocyanurate. *The Analyst* [online]. 1980, **105**(1249), 1-13 [cit. 2021-03-03]. ISSN 0003-2654. Dostupné z: doi:10.1039/an9800500305
- [33] CHO, Yeong Beom, Seung Hwa JEONG, Hyungphil CHUN a Yong Shin KIM. Selective colorimetric detection of dissolved ammonia in water via modified Berthelot's reaction on porous paper. *Sensors and Actuators B: Chemical* [online]. 2018, **256**, 167-175 [cit. 2021-02-18]. ISSN 09254005. Dostupné z: doi:10.1016/j.snb.2017.10.069
- [34] MINER, Gary. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21st Edition. *American Water Works Association. Journal* [online]. Denver: American Water Works Association, 2006, **98**(1), 130 [cit. 2021-02-18]. ISSN 0003150X. Dostupné z: <http://search.proquest.com/docview/221578868/>
- [35] GENFA, Zhang. a Purnendu K. DASGUPTA. Fluorometric measurement of aqueous ammonium ion in a flow injection system. *Analytical Chemistry* [online]. 1989, **61**(5), 408-412 [cit. 2021-02-18]. ISSN 0003-2700. Dostupné z: doi:10.1021/ac00180a006

- [36] CAO, Guiping, Yang SU, Yafeng ZHUANG a Jilai LU. A New Fluorescence Method for Determination of Ammonium Nitrogen in Aquatic Environment Using Derivatization with Benzyl Chloride. *Journal of the Brazilian Chemical Society* [online]. [cit. 2021-03-08]. ISSN 0103-5053. Dostupné z: doi:10.5935/0103-5053.20150351
- [37] LIANG, Ying, Yingming PAN, Qing GUO, Hongzhi HU, Chancui WU a Qian ZHANG. A Novel Analytical Method for Trace Ammonium in Freshwater and Seawater Using 4-Methoxyphthalaldehyde as Fluorescent Reagent. *Journal of Analytical Methods in Chemistry* [online]. 2015, 2015, 1-7 [cit. 2021-03-08]. ISSN 2090-8865. Dostupné z: doi:10.1155/2015/387207
- [38] Chlorid amonný. *PubChem* [online]. USA: National Center for Biotechnology Information, 2021 [cit. 2021-03-11]. Dostupné z: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Ammonium-chloride>
- [39] Chlorid amonný: Specifikace. *PentaChemicals* [online]. EU: PentaChemicals, 2021 [cit. 2021-03-11]. Dostupné z: https://www.pentachemicals.eu/soubory/specifikace/chlorid_amonny.pdf
- [40] Amoniak. *PubChem* [online]. USA: National Center for Biotechnology Information, 2021 [cit. 2021-03-11]. Dostupné z: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/222>
- [41] Amoniak: Specifikace. *PentaChemicals* [online]. EU: PentaChemicals, 2021 [cit. 2021-03-11]. Dostupné z: https://www.pentachemicals.eu/soubory/specifikace/amoniak_vodny_roztok_24+.pdf
- [42] Hydroxid sodný. *PubChem* [online]. USA: National Center for Biotechnology Information, 2021 [cit. 2021-03-11]. Dostupné z: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Sodium-hydroxide>
- [43] Hydroxid sodný: Specifikace. *PentaChemicals* [online]. EU: PentaChemicals, 2021 [cit. 2021-03-11]. Dostupné z: https://www.pentachemicals.eu/soubory/specifikace/hydroxid_sodny_pecky.pdf
- [44] Salicylan sodný. *PubChem* [online]. USA: National Center for Biotechnology Information, 2021 [cit. 2021-03-11]. Dostupné z: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/16760658#section=3D-Conformer>
- [45] Salicylan sodný: Specifikace. *PentaChemicals* [online]. EU: PentaChemicals, 2021 [cit. 2021-03-11]. Dostupné z: https://www.pentachemicals.eu/soubory/specifikace/salicylan_sodny.pdf
- [46] SHISHIDO, Silvia Mika a Marcelo Ganzarolli DE OLIVEIRA. Photosensitivity of Aqueous Sodium Nitroprusside Solutions: Nitric Oxide Release versus Cyanide Toxicity. *Progress in Reaction Kinetics and Mechanism* [online]. 2019, 26(2-3), 239-261 [cit. 2021-03-16]. ISSN 1468-6783. Dostupné z: doi:10.3184/007967401103165271

- [47] *Citronan trisodný: specifikace. P-lab* [online]. CZ: P-lab, 2021[cit. 2021-03-11]. Dostupné z: https://www.pentachemicals.eu/soubory/specifikace/citronan_sodny_dihydrat.pdf
- [48] Dichlorisokyanuran sodný. *PubChem* [online]. USA: National Center for Biotechnology Information, 2021 [cit. 2021-03-11]. Dostupné z: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Sodium-dichloroisocyanurate>
- [49] Síran draselný *PubChem* [online]. USA: National Center for Biotechnology Information, 2021 [cit. 2021-03-11]. Dostupné z: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/24507>
- [50] *Síran draselný: specifikace. Penta* [online]. CZ: Penta Chemicals EU, 2021. [cit. 2021-03-11]. Dostupné z: https://www.pentachemicals.eu/soubory/specifikace/siran_draselny.pdf
- [51] Kyselina dusičná. *PubChem* [online]. USA: National Center for Biotechnology Information, 2021 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Nitric-acid>
- [52] *Kyselina dusičná: specifikace. Penta* [online]. CZ: Penta Chemicals EU, 2021. [cit. 2021-05-11]. Dostupné z: https://www.pentachemicals.eu/soubory/specifikace/kyselina_dusicna_65.pdf
- [53] Hydrogensíran draselný. *PubChem* [online]. USA: National Center for Biotechnology Information, 2021 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/516920>
- [54] *Hydrogensíran draselný: specifikace. Penta* [online]. CZ: Penta Chemicals EU, 2021. [cit. 2021-05-11]. Dostupné z: https://www.pentachemicals.eu/soubory/specifikace/hydrogensiran_draselny.pdf
- [55] Spektrofotometr Hah DR5000: Specifiakce. Docplayer [online]. CZ: Hah 2021 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/6670658-Ten-nejvhodnejsi-pristroj-pro-fotometrickou-analyzu-a-kontrolu-kvality-vody.html>
- [56] BARTOŠ, Petr, Ivo CELJAK, Antonín DOLAN, Zbyněk HAVELKA a Radim KUNEŠ. *Emise amoniaku a zápachu z intenzivních chovů drůbeže a prasat ve vztahu k Závěrům o BAT* [online]. Praha: Ministerstvo zemědělství, 2017 [cit. 2021-5-3]. ISBN 978-80-7434-397-1.
- [57] ANDREOVSKÝ, Jan, HENELOVÁ, Vladimíra, ed. *Příručka ochrany kvality ovzduší* [online]. Praha, Chrudim: Sdružení společností IREAS centrum ; Vodní zdroje Ekomonitor, 2013 [cit. 2021-5-16]. ISBN 978-80-86832-77-7. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/prirucka_ochrany_kvality_ovzdusi/\\$FILE/000-prirucka_OPLZZ_komplet-20140408.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/prirucka_ochrany_kvality_ovzdusi/$FILE/000-prirucka_OPLZZ_komplet-20140408.pdf)
- [58] ČESKÁ REPUBLIKA. Vyhláška č. 415/2012 Sb. Vyhláška o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší. In: . Praha: Ministerstvo životního prostředí, 2012.

- [59] LIMAN, Martin. *Účinnost chemických reakcí probíhajících na membránovém reaktoru*. Brno, 2019. 62 s. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/113409>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, Ústav chemie materiálů. Vedoucí práce Tomáš Svěrák.

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Δ_{rozph}	změna entalpie jednotkového látkového množství složky při jejím přechodě ze stavu ideálního plynu do nekonečně zředěného kapalného roztoku	$J \cdot mol^{-1}$
Δz	změna vzdálenosti uvažovaného bodu	m
A	oblast ve které dochází k difuzi	m^2
a, b, c, d	stechiometrické koeficienty	—
A_b	absorbance slepého vzorku	—
A_f	plocha filmu	m^2
A_h	povrch volné hladiny	m^2
A_r	výsledná absorbance	—
A_s	absorbance měřeného vzorku	—
B	povrch bubliny	m^2
C	celková koncentrace	$mol \cdot dm^{-3}$
c_I	koncentrace látky uvnitř filmu	$mol \cdot dm^{-3}$
c_I	koncentrace látky 1 uvnitř filmu (koncentrační profil)	$mol \cdot dm^{-3}$
c_{I0}	koncentrace látky 1 na jedné straně filmu	$mol \cdot dm^{-3}$
c_{II}	koncentrace látky 1 na druhé straně filmu	$mol \cdot dm^{-3}$
C_A	molární koncentrace absorbované složky	$mol \cdot dm^{-3}$
C_{Ag}	molární koncentrace látky A v plynné fázi	$mol \cdot dm^{-3}$
C_{Al}	molární koncentrace látky A v kapalině, respektive v plynné fázi	$mol \cdot dm^{-3}$
C_{BL}^*	koncentrace látky B, na rozhraní plyn-kapalina,	$mol \cdot dm^{-3}$
C_{BL}^δ	koncentrace látky B v kapalně fázi	$mol \cdot dm^{-3}$
c_{gnh3}^*	rovnovážná koncentrace amoniaku v dotykové bublině	$mol \cdot dm^{-3}$
$C_{iL}(x)$	koncentrace i-té složky v kapalině ve vzdálenosti x od rozhraní	$mol \cdot dm^{-3}$
C_{iL}^*	koncentrace i-té složky na rozhraní na kapalně straně	$mol \cdot dm^{-3}$
C_I	koncentrace kapalně fáze	$mol \cdot dm^{-3}$
C_N	koncentrace amoniakálního dusíku v kapalině	$mol \cdot dm^{-3}$
c_N	koncentrace amoniakálního dusíku	$mol \cdot dm^{-3}$
$c_{začátek}$	koncentrace amoniakálního dusíku v vsádce na začátku	$mol \cdot dm^{-3}$
c_{konec}	koncentrace amoniakálního dusíku v vsádce na konci	$mol \cdot dm^{-3}$
c_{dest}	koncentrace amoniakálního dusíku v destilátu	$mol \cdot dm^{-3}$
c_{NH3}'	koncentrace amoniaku v bublině po opuštění vsádky	$mol \cdot dm^{-3}$
C_{NH3g}	koncentrace v plynné fázi nad kapalinou	$mol \cdot dm^{-3}$

c_{NH3g}	koncentrace amoniaku v bublině v čase τ	$\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$
$c_{NH3g}^{''}$	koncentrace amoniaku vstupující do plynné fáze nad hladinou	$\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$
c_o	počáteční koncentrace amoniaku v kapalině	$\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$
D	difuzí koeficient	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
D_{AL}	difúzní koeficient látky A v kapalně fázi	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
D_{Al}	difúzní koeficient složky a v kapalně fázi	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
D_{BL}	difúzní koeficient látky B, v kapalně fázi	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
DN	jmenovitá světlost potrubí	mm
EDTA	ethylendiamintetraoctová kyselina	—
F	podíl amoniaku přítomného v roztoku jako NH_3	—
f	stupeň nasycení vzduchu vstupujícího do prostoru nad vodou povrchu s ohledem na objemovou koncentraci kapalného amoniaku	—
H	Henryho konstanta	Pa
Ha	Hattova kritérium	—
H^+	koncentrace H^+ iontů z hodnoty pH	$\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$
H_A	Henryho konstanta pro složku A, respektive B	$\text{Pa}^3 \cdot \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$
H_B	Henryho konstanta pro složku B	$\text{Pa}^3 \cdot \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$
$H_i(T)$	Henryho konstanta i-té složky při teplotě T	$\text{Pa}^3 \cdot \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$
I_H	integrační konstanta	—
j_l	tok na jednotku plochy	$\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
$j_l _z$	tok v koordinátě z od hranice filmu	$\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
$j_l _{z+\Delta z}$	tok v koordinátě z + Δz od hranice filmu	$\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
K	koeficient přestupu hmoty (na základě plynné fáze)	$\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
K_r	rovnovážná konstanta ($c_{\text{gnh}_3^*} / c_{\text{NP}}$)	—
k'	koeficient přestupu hmoty z volné hladiny	$\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
k_{IC}^0	součinitel přestupu hmoty v kapalně fázi bez chemické reakce	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
k_l	rychlostí konstanta nevratné reakce	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
k_{Ag}	koeficient přestupu hmoty látky A v plynně fázi	$\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
k_{Al}	koeficient přestupu hmoty složky A v kapalině	$\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
$k_{Al,}$	koeficient přestupu hmoty látky A v kapalině	$\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
k_b	ionizační konstanta amoniaku ve vodě	—
K_{BH^+}	konstanta bazicity.	—
k_r	rychlostní konstanta reakce	$\text{s}^{-1} \cdot (\text{mol} \cdot \text{m}^{-3})^{1-\text{nr}}$
k_w	ionizační konstanta vody	—

l	šíře filmu	m
m	rovnovážná konstanta	—
m_N	hmotnost amoniakálního dusíku	g
m_{NH_3}	hmotnost čpavku v bublině	g
N_{Ag}	molární tok látky A v plynné fázi	$\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
N_{Al}	molární tok kapalné fáze složky A v kapalině	$\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
$N_{Al,}$	molární tok látky A v kapalině	$\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
N_{tl}	celkový molární tok kapalné fáze	$\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
P	celkový tlak	Pa
P_A	parciální tlak absorbované složky a v plynné fázi	Pa
P_i^*	tlak i-té složky na rozhraní plyn-kapalina	Pa
p_{vap}	tlak par	Pa
Q	průtok vzduchu	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
r	molární rychlost chemické reakce	$\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
R_s	účinnost separace	—
$R_{záchyt}$	účinnost zachytu	—
s	součin povrchu volné hladiny a koeficientu přestupu hmoty z volné hladiny	$\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
S	plocha průřezu	m^3
T	teplota	K
V	objem	dm^3
V_{dest}	objem destilátu	cm^3
V_{zbytek}	objem zbytku vsádky	cm^3
V_p	objem prošlého plynu	m^3
V_{p1}	objem prošlého plynu za reaktorem	m^3
V_{p2}	objem přivedeného stripovacího plynu	m^3
\dot{V}	objemový průtok	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
x_A	molový zlomek absorbované složky a v kapalné fázi	—
x_A^*	molární frakce látky A na rozhraní kapalina–plyn	—
$x_A^{\hat{}}$	molární frakce látky A v kapalině	—
y_{NH_3}	koncentrace NH_3 v plynné fázi	$\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$
z	vzdálenost	m
W	rychlost proudění	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
B_l	objemová frakce v kapalné fázi	—
δ_{NH_3}	podíl NH_3 v kapalné fázi	—

δ_{NH3}	zastoupení NH3	—
δ_{NH4+}	zastoupení NH4+	—
τ_b	doba setrvání bubliny ve vsádce	s
$\pi(x)$	supersaturační funkce	—
τ	čas	s